N° d'ordre : 111

THÈSE

présentée à la

Faculté des Sciences d' Orsay

Université de Paris

pour obtenir le

Titre de Docteur de l'Université

(Mention : SCIENCES)

par

Hugo TSCHARNACK

Laboratoire AIME COTTON C.N.R.S.

CARTES des DEFAUTS de PLANEITE et de FINESSE
des LAMES d'un FABRY-PEROT

Soutenue le 9 JUIN 1971 devant la commission d'Examen

M. P. JACQUINOT..... Président

MM. R. CHABBAL ..... } Examinateurs
F. FRANÇON ..... }
P. GIACOMO ..... }

ORSAY 1971

N° d'ordre :

THÈSE

présentée à la

Faculté des Sciences d' Orsay
Université de Paris

pour obtenir le

Titre de Docteur de l'Université

(Mention : SCIENCES)

par

Hugo TSCHARNACK

Laboratoire AIME COTTON C.N.R.S.

CARTES des DEFAUTS de PLANEITE et de FINESSE
des LAMES d'un FABRY-PEROT

Soutenue le devant la commission d'Examen

M. P. JACQUINOT..... Président

MM. R. CHABBAL ..... Examinateurs
F. FRANÇON .....
P. GIACOMO .....

ORSAY 1971

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

TABLE DES MATIERES

Pages

INTRODUCTION 1

CHAPITRE I - PRINCIPES FONDAMENTAUX 4

I - 1 - CARTE TOPOGRAPHIQUE 4

I - 2 - CARTE DES VARIATIONS DE FINESSE 9

CONCLUSION 11

CHAPITRE II - APPAREILLAGE ET METHODES EXPERIMENTALES 13

II - 1 - SYSTEME OPTIQUE 13

A) Le spectromètre Fabry-Perot 13

B) L'interféromètre de Michelson 15

II - 2 - SYSTEME DE BALAYAGE PAR VARIATION DE PRESSION 17

II - 3 - SYSTEME D'EXPLORATION DE LA SURFACE DU FABRY-PEROT. 21

A) Le sélecteur de surface 21

B) Le moteur pas à pas 23

C) Le disque programme et le moteur à courant continu 23

II - 4 - LES PICOAMPEREMETRES 24

II - 5 - L'ENREGISTREUR 24

II - 6 - LE SYSTEME DE CONVERSION DIGITALE 24

II - 7 - LA PERFORATRICE 24

II - 8 - PROCEDES EXPERIMENTAUX 25

II - 9 - TEMPS TOTAL NECESSAIRE 26

TABLE DES MATIERES

Pages

INTRODUCTION 1

CHAPITRE I - PRINCIPES FONDAMENTAUX 4

I - 1 - CARTE TOPOGRAPHIQUE 4

I - 2 - CARTE DES VARIATIONS DE PIMESCE 9

CONCLUSION 11

CHAPITRE II - APPAREILLAGE ET METHODES EXPERIMENTALES 13

II - 1 - SYSTEME OPTIQUE 13

A) Le spectromètre Fabry-Perot 13

B) L'interféromètre de Michelson 15

II - 2 - SYSTEME DE BALAYAGE PAR VARIATION DE PRESSION 17

II - 3 - SYSTEME D'EXPLORATION DE LA SURFACE DU FABRY-PEROT. 21

A) Le déflecteur de surface 21

B) Le moteur pas à pas 23

C) Le diagne programme et le moteur à courant continu 23

II - 4 - LES PICOAMPEREMETRES 24

II - 5 - L'ENREGISTREUR 24

II - 6 - LE SYSTEME DE CONVERSION DIGITALE 24

II - 7 - LA PERFORATRICE 24

II - 8 - PROCEDES EXPERIMENTAUX 25

II - 9 - TEMPS TOTAL NECESSAIRE 26

Pages

CHAPITRE III - EXPLOITATION DES DONNEES ET PRECISION 27

III - 1 - POLYNOME DECRIVANT LA POSITION DES EXTREMUMS DES FRANGES 27

A) Localisation des maximums et minimums 29

B) Le polynôme 34

III - 2 - DETERMINATION DE LA POSITION DE LA FONCTION FABRY-PEROT 34

A) La méthode de lissage 34

B) Méthode d'ajustage par moindres carrés d'une fonctiond'Airy 35

III - 3 - DETERMINATION DE LA FINESSE EFFECTIVE 36

A) Calcul par la fonction d'Airy 36

B) Méthode d'ajustage par moindres carrés d'une fonction Fabry-Perot convoluée 36

III - 4 - LES CARTES 40

CHAPITRE IV - CORRECTIONS APPLIQUEES 41

IV - 1 - LA CORRECTION DU CENTRE 41

IV - 2 - LOCALISATION DES FRANGES DE REFERENCE DU MICHELSON . 43

IV - 3 - ANOMALIE DU MICHELSON 46

IV - 4 - MODIFICATION DU PLAN DE REFERENCE DES COURBES DE NIVEAU 50

CHAPITRE V - QUELQUES RESULTATS 52

CONCLUSION 55

BIBLIOGRAPHIE 58

Je suis très heureux de pouvoir exprimer ici ma gratitude pour toutes les contributions qui ont rendu possible l'achévement de ce travail.

Je tiens particulièrement à remercier Monsieur le Professeur CHABBAL qui m'a proposé de venir au Laboratoire Aimé Cotton et m'a aidé à éxécuter ce projet. Il a en outre, supervisé ce travail et fait tout son possible pour rendre mon séjour en France extrêmement agréable.

Je désire remercier le Centre National de la Recherche Scientifique et en particulier Monsieur le Professeur JACQUINOT, pour l'équipement et l'aide technique qui ont permis le développement de ce travail.

Monsieur le Professeur GIACOMO s'est toujours intéressé à ce projet. Je le prie de bien vouloir trouver ici l'expression de ma gratitude pour les nombreux conseils qu'il m'a prodigué lors de la rédaction de cette thèse.

Je veux aussi remercier Monsieur le Professeur KENNETH L. ANDREW pour ses encouragements continuels, l'intérêt qu'il à porté à ce travail, ses nombreuses suggestions et sa contribution à la majeure partie du programme de calcul.

Je ne peux pas passer sous silence la contribution incalculable d'Emile PELLETIER qui, non seulement m'a enseigné les principes et les techniques expérimentales et a écrit une partie du programme de calcul, mais encore a essayé de m'apprendre le français et m'a aidé a résoudre mes problèmes personnels. Il a vraiment été mon "ange gardien".

Je voudrais remercier Monsieur S. GERSTENKORN pour son appui et ses conseils dans le choix des composants optiques, ainsi que Harold P. LARSON pour des fructueuses discussions.

Je tiens à remercier de leur contribution tous les chercheurs et le personnel du Laboratoire Aimé Cotton, en particulier Messieurs SEGUIN et Guy MICHEL pour leur aide lors de la contribution de la partie électronique de l'appareil, Messieurs FREVILLE et FATTAZ pour la réalisation des pièces mécaniques et Monsieur CALVIGNAC pour l'aide qu'il m'a apportée lors de la conception et du dessin de cet appareil. En fin je remercie J.M. HELBERT qui a bien voulu mettre à ma disposition son manomètre.

Je tiens a exprimer ma gratitude à Mr JOHANIN et son équipe du Centre de Calcul de la Faculté d'ORSAY pour leur excellent service.

Ce travail a pu être mené à bien grâce à une aide financière de : The Board of Regents of Wisconsin State Universities.

Après avoir passé presque trois ans en France, je veux remercier les très étonnantes et sympathiques personnes françaises qui ont rendu mon séjour extrêmement agréable.

o o o

Après mon départ Monsieur le Professeur FRANÇON a bien voulu accepter de faire partie de mon jury, je tiens à le remercier vivement.

INTRODUCTION

Pendant les dix dernières années, avec le rapide développement de l'emploi des LASER et avec les applications modernes de l'étalon de Fabry-Perot notamment son utilisation en spectroscopie à haute résolution, la planéité des lames et la qualité des revêtements réflecteurs ont dû être considérablement améliorées. Il est maintenant nécessaire d'obtenir des paires de lames recouvertes d'un revêtement réflecteur avec des défauts inférieurs à $\lambda/200$ (λ étant la longueur d'onde de la lumière étudiée) sur une surface étendue(disque de 100mm de diamètre par exemple) avec un minimum de micro-défauts, un pouvoir réflecteur élevé et une absorption aussi faible que possible.

Ces conditions découlent des études faites par CHABBAL [1] et DAVIS [2] sur les limitations des performances de l'interféromètre de Fabry-Perot dues aux défauts de planéité, facteur de réflexion et d'absorption.

Ces études ont ouvert la voie à de nombreuses recherches : On a cherché à accroître la qualité des surfaces optiques [3] et celle des revêtements réflecteurs déposés sur les lames [4] et essayé de corriger les défauts de planéité par des dépôts appropriés de couches diélectriques sur les surfaces [5] [6] . Aussi bien pour étudier les défauts à corriger que pour vérifier l'amélioration obtenue, on doit être capable d'obtenir une carte très précise de la variation d'épaisseur entre les lames du Fabry-Perot ainsi qu'une carte des variations de finesse. De nombreuses méthodes ont été proposées pour mesurer les variations d'épaisseur entre les surfaces optiques [7] à [13] .

Les méthodes de KOPPELMANN et KREBS [7] , ROESLER et TRAUB [8] et de DUONG, GERSTENKORN, HELBERT [9] paraissent être les plus intéressantes, du point de vue de la précision et de la commodité des mesures.

KOPPELMANN et KREBS sont capables de mesurer des variations de $\lambda/1000$ avec des lames recouvertes d'un revêtement réflecteur. La plus grande difficulté inhérente à leur méthode est d'obtenir un éclairement parfaitement uniforme, ainsi qu'un pouvoir réflecteur et une absorption constants sur toute la surface des lames; ces trois conditions étant imposées par le principe même de la méthode.

ROESLER et TRAUB ont réalisé des cartes de lames sans revêtement réflecteur avec une précision de l'ordre de $\lambda/500$. La méthode est semblable à celle de KOPPELMANN et KREBS mais ils effectuent la mesure après réflexion sur les surfaces optiques, un signal de référence étant utilisé pour corriger les variations de l'intensité du faisceau incident du facteur de réflexion.

DUONG, GERSTENKORN et HELBERT ont obtenu une reproductibilité supérieure à $\lambda/2000$ et sont à même de détecter des variations d'épaisseur de $\lambda/1500$ entre des lames recouvertes d'un revêtement réflecteur. Cette méthode est plus complexe car on doit enregistrer la fonction Fabry-Perot ainsi que les franges de référence d'un interféromètre de Michelson.

Cette dernière méthode a été employé dans notre étude : elle permet d'obtenir une topographie des défauts de surface des lames et simultanément une carte de la finesse puisqu'elle fournit la fonction Fabry-Perot. Malgré sa complexité, elle a pu être mise en oeuvre grâce aux procédés digitaux modernes d'enregistrement des résultats expérimentaux.

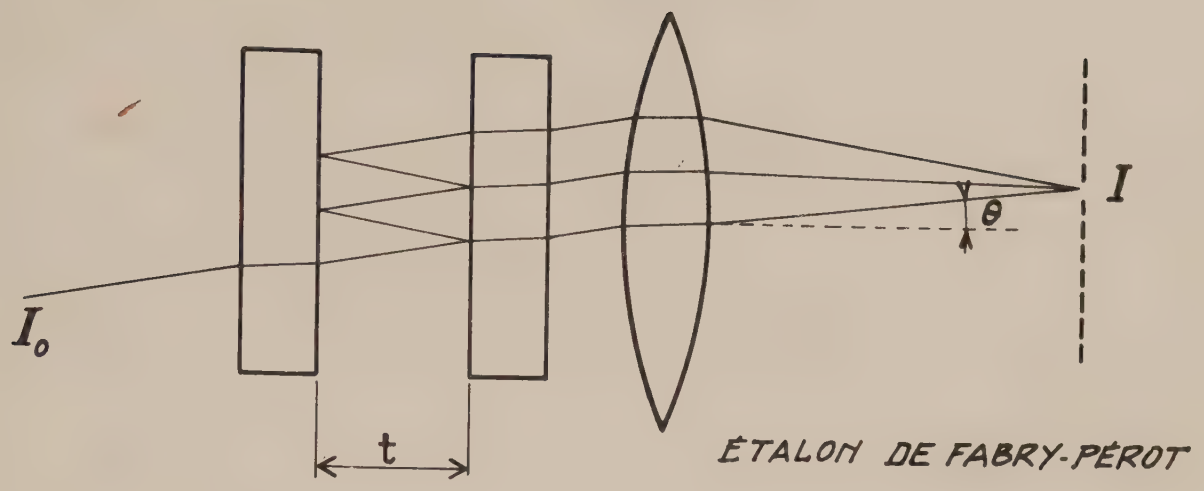


fig. 1

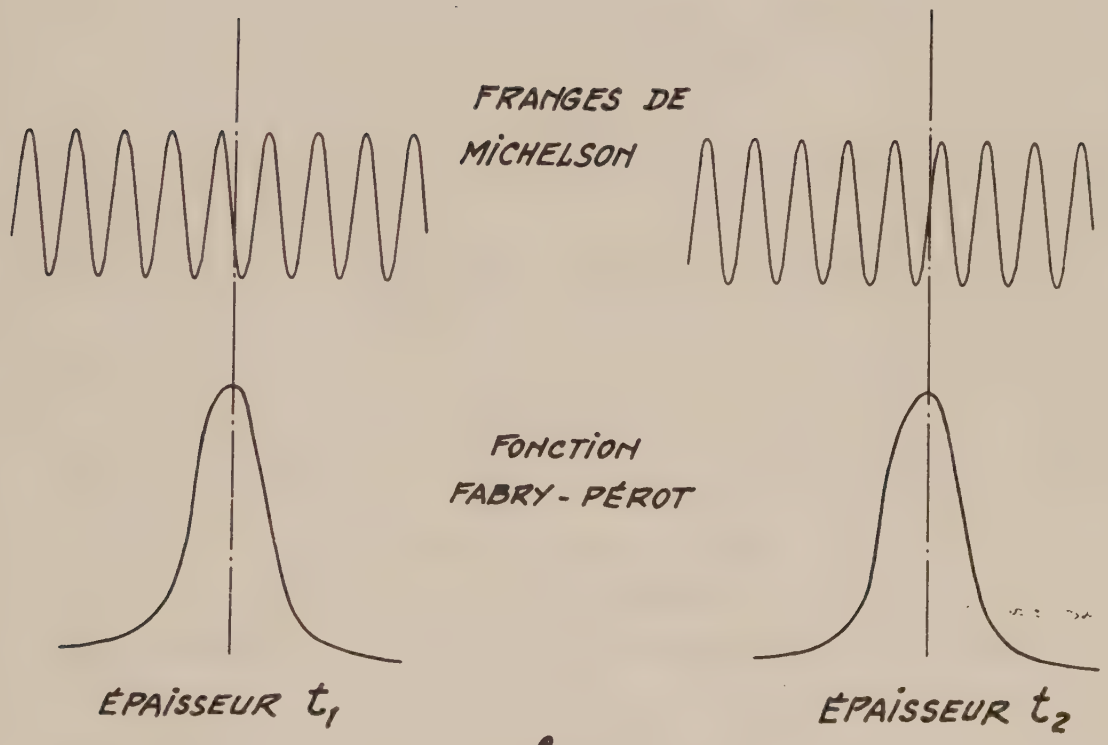


fig. 2

PRINCIPE DE MESURE DES DÉFAUTS DE PLANÉITÉ

CHAPITRE I

PRINCIPES FONDAMENTAUX

I - 1 - CARTE TOPOGRAPHIQUE

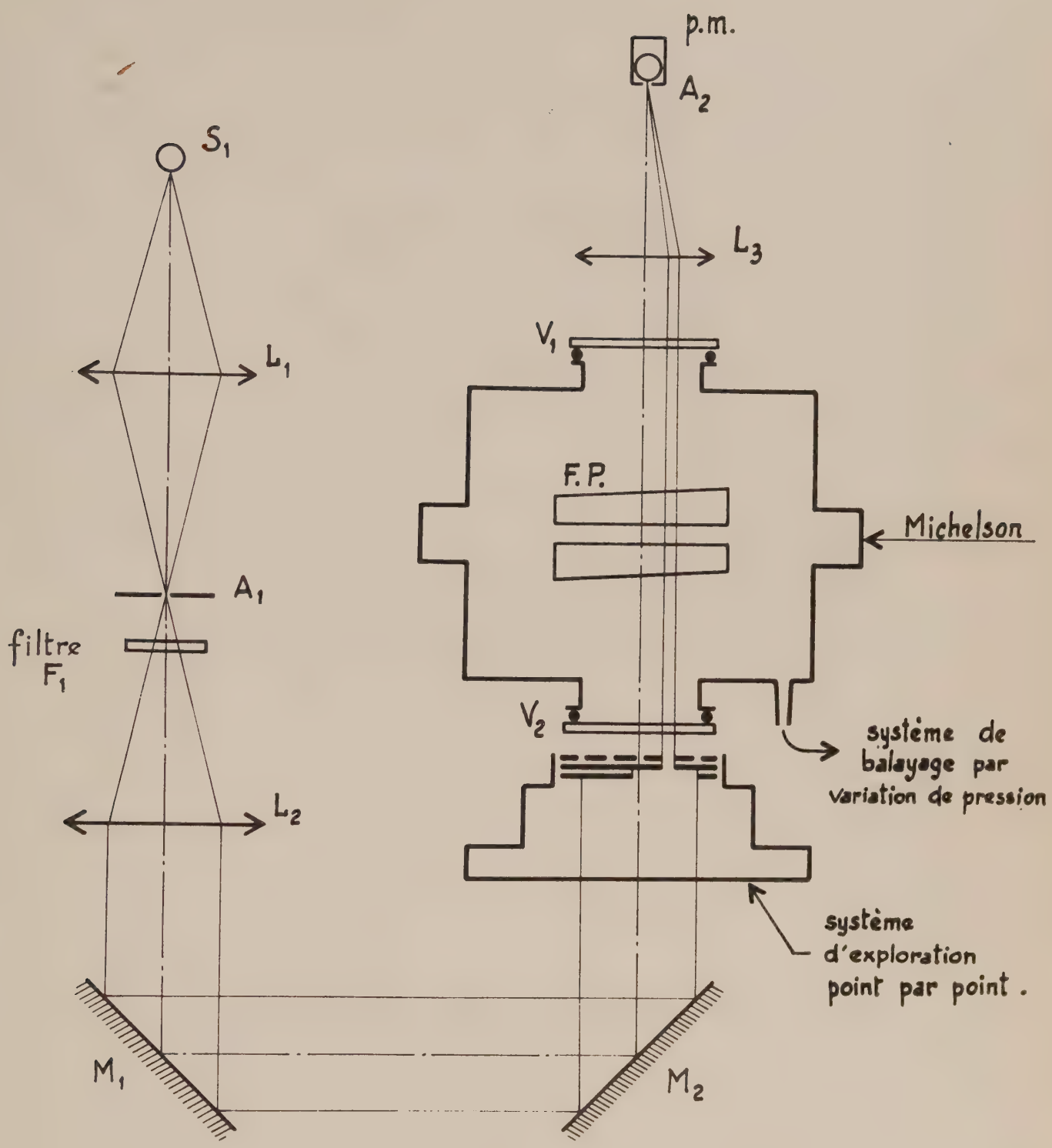
Un étalon de Fabry-Perot idéal (figure 1) est constitué d'une paire de miroirs parfaitement plans, semi transparents dont le facteur de réflexion est R , et T la transmission. Les deux miroirs sont placés en regard l'un de l'autre à une distance t et les surfaces sont rigoureusement parallèles. Dans la direction θ , la transmission $T = I/I_o$ d'un étalon est donnée par la fonction d'Airy [14]

$$T = \tau \left[1 + \frac{4R}{(1-R)^2} \sin^2 \left(\frac{\Phi}{2} \right) \right]^{-1}$$

où $\tau = \left[\frac{T}{(1-R)} \right]^2$ et $\Phi = 4 \pi n t \sigma \cos \theta + \Psi + \Psi'$

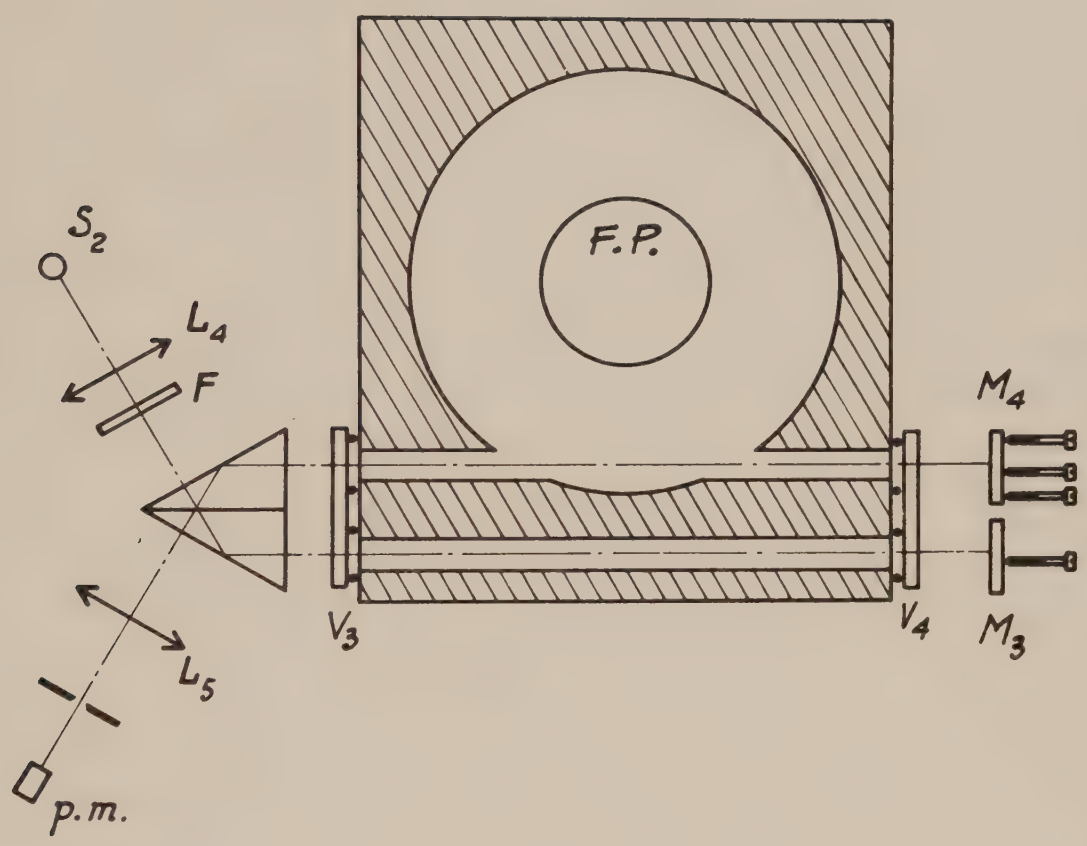
Ψ et Ψ' sont les déphasages retard à la surface des lames
n est l'indice de réfraction entre les lames et σ le nombre d'ondes de la lumière incidente. Si l'étalon de Fabry-Perot est éclairé avec une raie monochromatique provenant d'une source étendue, un système d'anneaux se forme dans le plan focal de la lentille placée derrière l'étalon. De plus l'équation $m = \frac{\Phi}{2\pi}$ exprime la relation entre l'ordre d'interférence m et n , t , σ , θ [15]. Si on utilise maintenant cet étalon pour en faire un spectromètre Fabry-Perot selon le procédé décrit par JACQUINOT et DUFOUR [16] (figure 4), on peut faire varier la transmission de l'étalon en modifiant l'indice de réfraction du milieu entre les lames et on observe la transmission dans une direction perpendiculaire au plan des lames.

Avec une très bonne approximation, on peut considérer que l'indice de réfraction d'un gaz est une fonction linéaire de la pression [17] .



MONTAGE OPTIQUE

fig. 4



MONTAGE DU MICHELSON

fig. 5

Ainsi, le balayage de l'étalon peut se faire en plaçant le Fabry-Perot dans une cloche où l'on fera varier la pression du gaz. Le principe de la mesure des défauts de planéité est simple : Si on observe la transmission d'une source monochromatique de nombre d'ondes σ à travers une petite portion de la surface de l'étalon de Fabry-Perot dont l'épaisseur est t_1, l'ordre m_1 apparaît lorsque l'indice de réfraction du milieu à la valeur :

$$n_1 = \frac{m_1}{2\, t_1\, \sigma}$$

De même, pour une autre portion de la surface de l'étalon, dont l'épaisseur est t_2, le même ordre m_1 apparaît quand $n_2 = m_1/2\, t_2\, \sigma$

D'où $$t_1/t_2 = n_2/n_1$$

Si $dn = n_2 - n_1$ et $dt = t_1 - t_2$, on peut exprimer la différence d'épaisseur entre deux points de l'étalon par la relation $dt = t\,\frac{dn}{n}$ où t est l'épaisseur moyenne de l'étalon.

Si on associe un interféromètre de Michelson auxiliaire de type Saunders de telle façon qu'un des bras du Michelson soit connecté à la cloche de l'étalon (figure 5), le rapport $\Delta P/P_o$ où ΔP est le changement de pression du gaz et P_o la pression de référence, sera le même à la fois pour le gaz entre les lames de l'étalon et pour le gaz dans l'un des bras du Michelson. La figure 2 représente un enregistrement simultané de l'intensité de la lumière issue d'une source monochromatique et transmise par l'étalon de Fabry-Perot et l'intensité transmise par le Michelson pendant la variation de pression dans la cloche de l'étalon. Un changement d'épaisseur entre les lames entraîne un déplacement relatif de la fonction F.P. par rapport aux franges de Michelson.

Pour le Michelson on a la relation :

$$m' = 2\, n\, T'\, \sigma'\, \cos\theta$$

où m' est l'ordre d'interféromètre dans le Michelson, σ' le nombre d'ondes de la radiation transmise par le Michelson et $2T'$ la différence de

marche entre les deux bras. Par conséquent pour changer m' d'une unité nT' doit changer de $1/2\,\sigma'$. Ainsi pour une variation de trajet optique correspondant au défilement d'une frange de Michelson :

$$dn_m = 1/2T'\,\sigma'$$

Par exemple, un déplacement de la fonction F.P. d'une frange de Michelson correspond à un changement d'épaisseur du F.P. :

$$dt = \frac{t}{2\,n\,T'\sigma'}$$

La périodicité de la fonction d'Airy en fonction de σ est déterminée par le paramètre $2\,n\,t\cos\theta$ pour une source monochromatique. L'inverse de cette quantité est la séparation entre deux maximums de la fonction et est appellé intervalle spectral libre $\Delta\sigma$. Le changement d'indice de réfraction nécessaire pour balayer un intervalle spectral libre (I.S.L.) pour l'étalon est donc :

$$dn_s = 1/2\,t\,\sigma$$

Le nombre de franges de Michelson dans un intervalle spectral libre est donc :

$$q = \frac{dn_s}{dn_m} = \frac{T'}{t}\,\frac{\sigma'}{\sigma}$$

Le déplacement d'une frange de Michelson correspond à un changement d'épaisseur du F.P. de :

$$dt = \left(\frac{1}{nq}\right)\frac{\lambda}{2}$$

λ étant la longueur d'onde de la lumière monochromatique transmise par le F.P. .

Si la longueur du Michelson est de 290mm et la distance entre les lames du F.P. de 4mm , lorsque σ est égal à σ' , un déplacement d'une frange de Michelson correspond à un défaut de planéité de $\lambda/150$. Ainsi, si un point quelconque des lames est choisi comme ayant l'épaisseur optique de référence, l'épaisseur en tous les autres points des lames peut être mesurée par rapport à ce point et une carte peut être réalisée.

Il est important de noter que la précision de cette méthode n'est liée ni à l'uniformité de l'intensité de la lumière incidente ni à celle des facteurs de réflexion ou d'absorption des revêtements réflecteurs. La précision dans la détermination de la position du pic de la fonction F.P. par rapport aux franges de Michelson conditionne la précision de la méthode et celle-ci est limitée par le rapport signal sur bruit du système photométrique, la stabilité de la source et la stabilité du montage de l'étalon.

I - 2 - CARTE DES VARIATIONS DE FINESSE

La théorie classique du spectromètre Fabry-Perot suppose que les lames sont parfaitement planes et parallèles et que chaque diaphragme placé avant ou après l'étalon a une largeur nulle. Naturellement ces conditions ne sont pas réalisables et une théorie plus complète est nécessaire.

CHABBAL [1] a montré que la fonction instrumentale $W(\sigma)$ n'est pas la fonction d'Airy, mais plutôt le produit de composition de trois fonctions : $A(\sigma)$ la fonction d'Airy, $F(\sigma)$ la fonction exploratrice et $D(\sigma)$ la fonction défaut. Ainsi :

$$W(\sigma) = A(\sigma) * F(\sigma) * D(\sigma)$$

Chacune de ces fonctions a une largeur représentée par w, a, f et d . La largeur w est liée à a, f et d de manière complexe; on peut écrire symboliquement :

$$w = a \oplus d \oplus f$$

Mais w est toujours plus grande que la plus grande des trois valeurs a, d et f et est plus petite que la somme $a + d + f$.

La largeur instrumentale w est souvent appelée limite de résolution, elle donne la différence de nombre d'ondes entre deux radiations monochromatique juste résolues

$$R = \frac{\sigma}{\delta\sigma} = \frac{\sigma}{w}$$

CHABBAL définit la finesse comme le rapport de l'I.S.L. à la largeur de la fonction considérée. Ainsi la finesse instrumentale est :

$$N_w = \frac{\Delta\sigma}{w}$$

ou

$$R = m\, N_w$$

La finesse est alors le pouvoir de résolution par unité d'ordre d'interférence. Plus précisement la finesse est le nombre maximum de pics de $W(\sigma)$ qui peuvent être résolus entre deux ordres consécutifs. C'est le nombre maximum d'éléments spectraux qui peuvent être observés; c'est la raison pour laquelle la notion de finesse est si importante dans l'utilisation du F.P. CHABBAL montre de plus que :

$$N_R = \frac{\Delta\sigma}{a} = \frac{\pi\sqrt{R}}{1 - R} \qquad \text{(finesse réflectrice)}$$

$$N_D = \frac{\Delta\sigma}{d} = \frac{k}{2} \qquad \text{(finesse limite)}$$

Si les lames ont une planéité λ/k et

$$N_f = \frac{\Delta\sigma}{f} = \frac{2\,\pi\,\Delta\,\sigma}{\sigma . d\,\Omega}$$

où $d\,\Omega$ est l'angle solide sous tendu par le diaphragme isolateur vu de la lentille collimatrice du spectromètre.

La fonction enregistrée $Y(\sigma)$ par un spectromètre Fabry-Perot est la convolution de la fonction d'appareil $W(\sigma)$ par la fonction source $B(\sigma)$

$$Y(\sigma) = W(\sigma) * B(\sigma)$$

de largeur

$$y = w \oplus b = a \oplus d \oplus f \oplus b$$

et

$$N = \frac{\Delta\sigma}{y}$$

Ainsi on peut mesurer en plusieurs points de l'étalon la largeur y de la fonction F.P. enregistrée et si on mesure l'I.S.L. de l'étalon on peut cal-

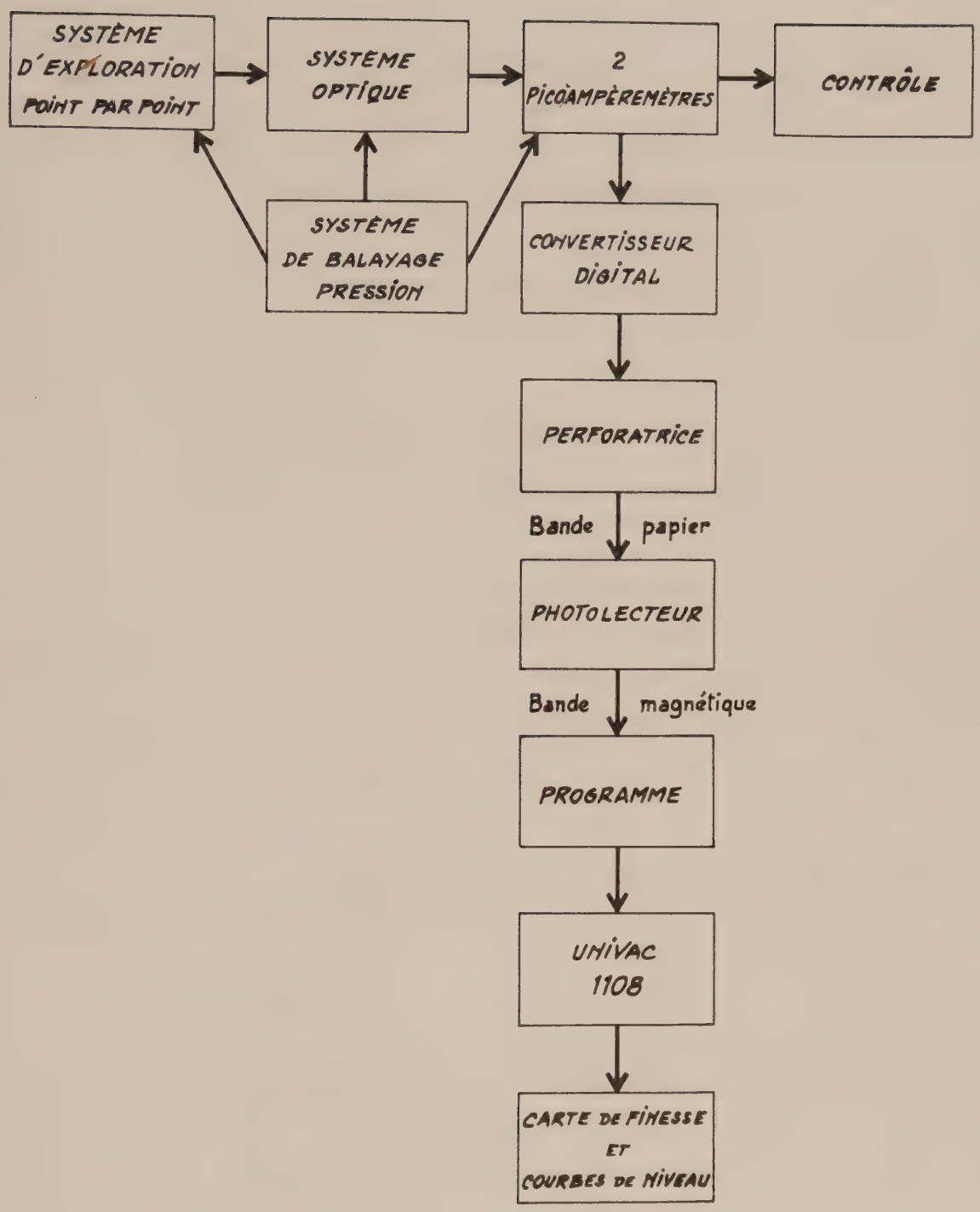
culer la finesse en chaque point et tracer alors une carte des variations de finesse.

CONCLUSION

Ces cartes sont très utiles pour l'étude de la qualité et de la reproductibilité des revêtements de Fabry-Perot réalisés. Il est ainsi possible d'étudier les imperfections des revêtements dus à des défauts d'uniformité des couches déposées par évaporation. De plus, l'effet de variation de finesse réflectrice sur les cartes de planéité peut être observé.

Ces cartes sont nécessaires pour permettre l'amélioration de planéité d'une paire de lames de F.P. . En effet pour améliorer la planéité des lames il faut déposer sur une des lames une couche mince d'épaisseur non uniforme pour compenser les défauts de la surface. On pourra alors comparer les cartes réalisées avant et après l'"amélioration". Si la mesure de la variation d'épaisseur optique est suffisamment précise, on pourra déterminer le changement de phase introduit par la couche mince rajoutée. De plus la mesure de la variation du facteur de réflexion R permettra d'étudier si la couche rajoutée se comporte comme une couche homogène. On aura ainsi une idée de la validité du modèle mathématique simple généralement utilisé pour calculer les propriétés optiques des couches minces.

Nous n'avons trouvé aucune référence d'un travail montrant l'intérêt d'obtenir une carte de finesse; généralement quand il est question de finesse il s'agit de finesse réflectrice et la méthode de mesure la plus couramment employée est celle de GIACOMO [18] .



PRINCIPE DE MESURE

fig. 3

CHAPITRE II

APPAREILLAGE ET METHODES EXPERIMENTALES

La figure 3 donne un organigramme du principe de mesure.

II - 1 - SYSTEME OPTIQUE

A) Le spectromètre Fabry-Perot

La figure 4 donne le principe du schéma optique.

a) la source

La source S_1 est un tube a décharge sans électrode en pyrex, excité en haute fréquence et contenant du mercure 198 . Sa longueur est de 60mm et son diamètre 10mm . Cette source a été choisie car elle donne une raie monochromatique facile à isoler et si la puissance d'alimentation est faible sa stabilité est excellente.

b) le filtre

Le filtre F (KODAK 77A) s'est révélé très suffisant pour isoler la raie 5461Å de la source.

c) les lentilles

La lentille collimatrice L_2 est montée de telle façon que son centre soit sur l'axe optique du système et que le diaphragme d'entrée A_1 soit dans son plan focal. Cette lentille a un diamètre de 80mm et sa distance focale est de 1500mm . Une longue focale est utilisée pour assurer une collimation précise du faisceau.

L'objectif L_3 est centré sur l'axe optique du système et le diaphragme de sortie A_2 est dans son plan focal. Cette lentille a un diamètre de 80mm , sa distance focale est de 1000mm . Les deux lentilles L_2 et L_3 sont de bonne qualité optique. Le condenseur L_1 est placé de telle

façon qu'il focalise l'image de la source sur le diaphragme d'entrée.

d) les diaphragmes d'entrée et de sortie

Les diaphragmes A_1 et A_2 sont montés de façon a pouvoir être facilement ajustables horizontalement et verticalement. Les deux diaphragmes sont sur l'axe optique du système et sont conjugués l'un de l'autre. Un seul diaphragme serait suffisant s'il n'y avait pas de diffusion ou de réflexions dissymétriques entre les deux diaphragmes.

Les deux diaphragmes sont circulaires et leurs diamètres sont calculés pour obtenir un maximum de luminosité. Ceci est fait en cherchant à ajuster la largeur de la fonction diaphragme isolateur avec la largeur de la fonction étalon. Si N est la finesse de l'étalon et t l'épaisseur optique, le diamètre d'ouverture du diaphragme pour une lentille collimatrice de distance focale f_1 est : $f_1 \beta_o$ où l'angle d'ouverture β_o est approximativement égal à : $2(1/N\ t\ \sigma)^{\frac{1}{2}}$.

e) les miroirs

Les miroirs M_1 et M_2 ont un diamètre de 110mm , leur planéité est de l'ordre de $\lambda/10$.

f) le récepteur photoélectrique

Le photomultiplicateur est un E.M.I. type 6094B . La surface sensible est en bout du tube, le courant d'obscurité est suffisamment faible pour ne pas nécessiter un refroidissement du récepteur. L'image de l'ouverture d'entrée se forme sur la photocathode; on minimise ainsi les variations qui pourraient être dues au déplacement de la région éclairée sur la photocathode.

g) monture de l'interféromètre

L'appareil utilisé est une monture pour des lames de 70mm de diamètre, réalisé d'après des schémas provenant de l'Université de Wisconsin. Une cale cylindrique en invar, comportant trois touches de même épaisseur est placée entre les lames de l'interféromètre. Un réglage fin du pa-

rallèlisme peut être obtenu au moyen de ressorts en exerçant une légère pression sur le bord des lames, en face des touches de la cale d'invar. Ce montage est extrêmement stable, ROESLER et TRAUB [8] considèrent que la distorsion des lames est inférieure à $\lambda/150$. Pour s'assurer de la stabilité du montage, on attend plusieurs heures avant de placer l'interféromètre dans la cloche à vide de l'appareil.

La distance entre les deux lames de l'interféromètre a toujours, dans cette étude été de l'ordre de 4mm .

h) la cloche du Fabry-Perot

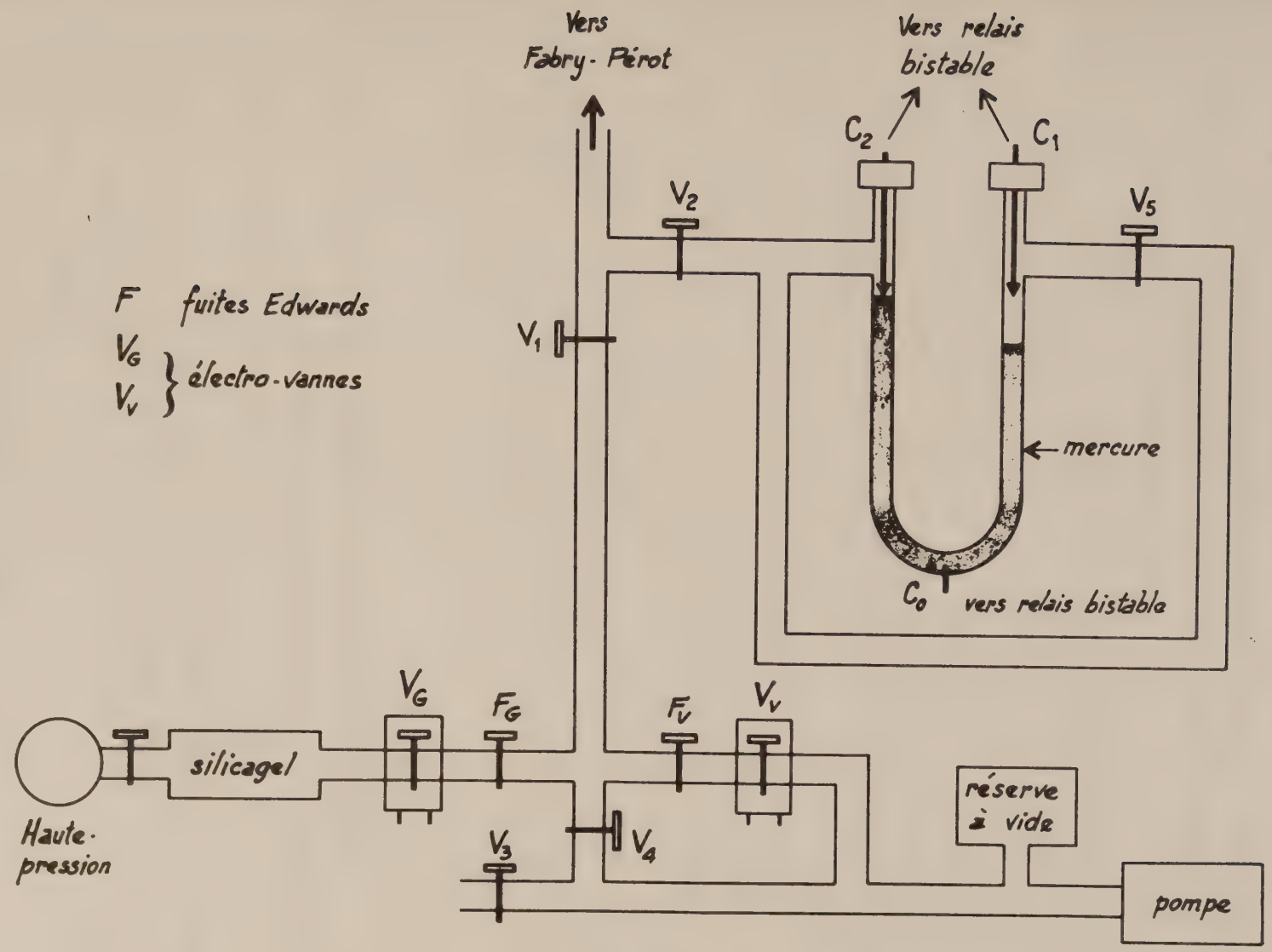
La cloche étanche, reliée à l'interféromètre de Michelson, possède deux fenêtres en regard des lames (figure 5). Trois vis de réglage permettent un ajustement précis de son axe. A l'intérieur la monture du F.P. est positionnée selon le principe "point - trait - plan". Cette cloche étanche est reliée au système balayage par variation de pression. Les lames sont montées de telle façon que l'axe optique du F.P. soit confondu avec celui du système. Le repérage du centre peut être effectué grâce à un papier calque placé sur la face extérieure d'une lame du F.P. . Les surfaces réflectrices sont perpendiculaires à l'axe optique quand la lumière réfléchie par ces surfaces est focalisée sur le diaphragme d'entrée.

B) <u>L'interféromètre de Michelson</u>

L'interféromètre de Michelson et sa position par rapport aux lames du F.P. sont représentés sur la figure 5. Cet interféromètre est un appareil du type SAUNDERS analogue à celui décrit par DUONG, GERSTENKORN et HELBERT [19].

a) disposition géométrique

Les deux bras du Michelson ont 290mm de long et sont dans un plan horizontal confondu avec le plan moyen du F.P.; le diamètre utile des faisceaux est de 10mm. L'axe du Fabry-Perot est à 115mm de l'ouverture du bras du Michelson.



SYSTÈME DE BALAYAGE PRESSION

fig. 6

b) composants optiques

La séparation des faisceaux est obtenue à l'aide d'un prisme de KÖSTERS ce qui dispense de l'emploi d'une lame compensatrice. Toutes les faces du prisme ont une planéité de $\lambda/5$.

La source S_2 est une lampe à mercure basse pression (Philips). Le filtre F (Kodak 77A) est transparent pour la longueur d'onde 5461Å du mercure. Un filtre neutre est placé devant la lentille L_4 pour réduire l'intensité. Les deux fenêtres V_3 et V_4 sont utilisées pour minimiser l'effet d'un déplacement quelconque qui peut être causé par la variation de pression dans la cloche. Les miroirs M_3 et M_4 sont réglés pour avoir une différence de marche voisine de zéro. Le miroir M_3 est maintenu en position grâce à une seule vis placée en son centre et ne peut pas être ajusté. La position du miroir M_4 peut être modifiée par trois vis de réglage. Une fois réglés, les miroirs sont maintenus avec de la cire à cacheter. Le photomultiplicateur (RCA 1P 21) présente un très faible courant d'obscurité et son refroidissement n'est pas nécessaire. Le Michelson donne des franges dont le contraste peut facilement dépasser 80% et si la température du laboratoire est stabilisée par un thermostat, le Michelson reste réglé pendant plusieurs semaines.

II - 2 - SYSTEME DE BALAYAGE PAR VARIATION DE PRESSION

Ce système est voisin de celui décrit par HELBERT [20] , il est schématisé sur la figure 6.

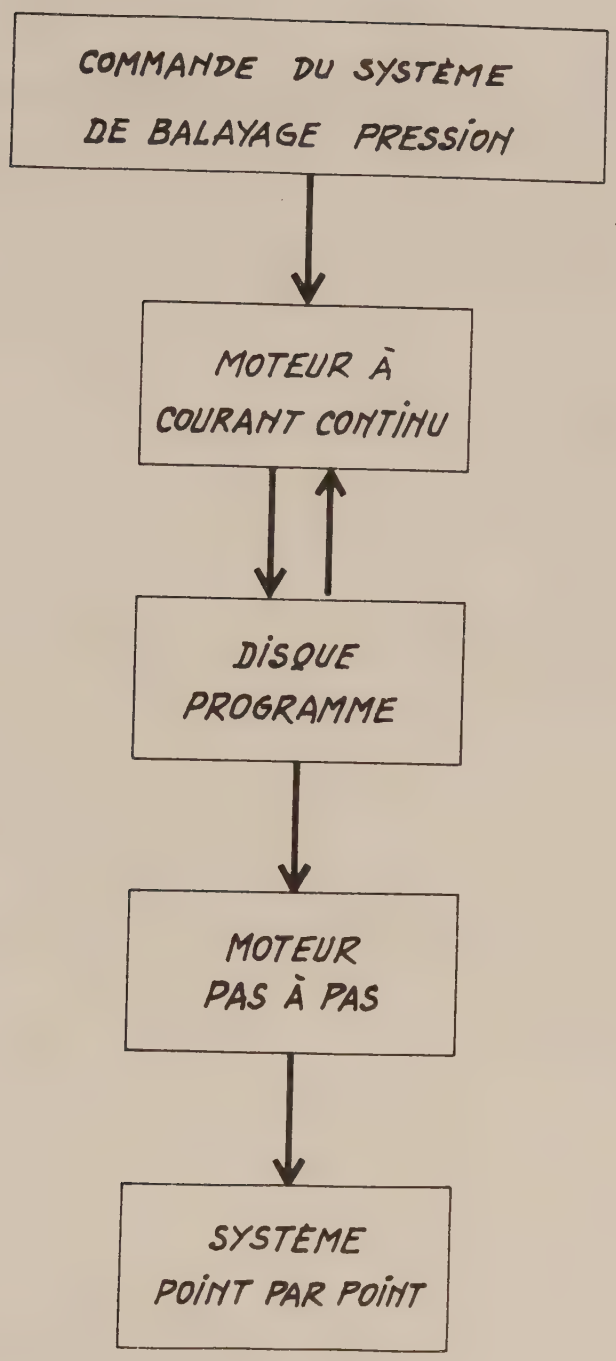
V_1, V_2, V_3 et V_4 sont des vannes Edwards d'un demi-pouce d'ouverture; V_5 est un robinet en verre pyrex, V_G et V_v sont des électrovannes (Lucifer types 122 AO 3 et 121 AO 151) F_G et F_v sont des fuites à aiguille (Edwards).

La réserve à vide a la même dimension que la cloche de l'étalon. Le tube desséchant contient du silicagel; la source de haute pression est une

bouteille de gaz carbonique comprimé. Après avoir monté dans la cloche de l'étalon les lames à étudier, on ferme les vannes V_2, V_G et V_3 alors que la vanne V_1 est ouverte et que l'on fait le vide dans la cloche. Ensuite la bouteille de gaz carbonique est ouverte à une pression de 3 atmosphères; on ouvre ensuite les vannes V_4 et V_v puis la vanne V_G. Pendant que le gaz entre dans la cloche, on enregistre simultanément les franges de Michelson et la fonction Fabry-Perot. Quand l'ordre désiré de la fonctionF.P. apparaît on ferme V_G et on ouvre V_2 et V_5. On travaille habituellement avec une pression dans la cloche voisine de la pression atmosphérique. Avec une épaisseur de F.P. voisine de 4mm, la pression est de 0,9 atmosphère. La vanne V_5 est alors fermée et le système est prêt pour un balayage automatique.

Si V_G est maintenant ouverte, la pression augmentera jusqu'à ce que la surface du mercure affleure le contact C_1 dans le manomètre, ce qui déclenche un relais qui ferme V_G et ouvre V_v. La pression décroit alors jusqu'à ce que le contact s'établisse entre C_2 et le mercure déclanchant ainsi le processus inverse. En faisant varier les hauteurs des contacts C_1 et C_2 on règle l'amplitude de la variation de pression. Généralement on travaille avec un balayage en pression d'environ 0,03 atmosphère, ce qui correspond à 14 franges du Michelson. Les fuites F_G et F_v sont ajustées pour régler la vitesse de balayage. En général la vitesse est de 0,017 atm/mn, soit environ une frange de Michelson en 7 secondes. Ainsi un balayage de 14 franges dure environ 100 secondes.

En outre, quand les relais de changement de sens du balayge en pression sont déclenchés, un autre relais est fermé pour indiquer la fin d'un balayage sur l'enregistreur digital et un troisième relais commandant l'avance du système d'exploration point par point de la surface du F.P. est déclenché.



PRINCIPE DU SYSTÈME D'EXPLORATION POINT PAR POINT

fig. 7

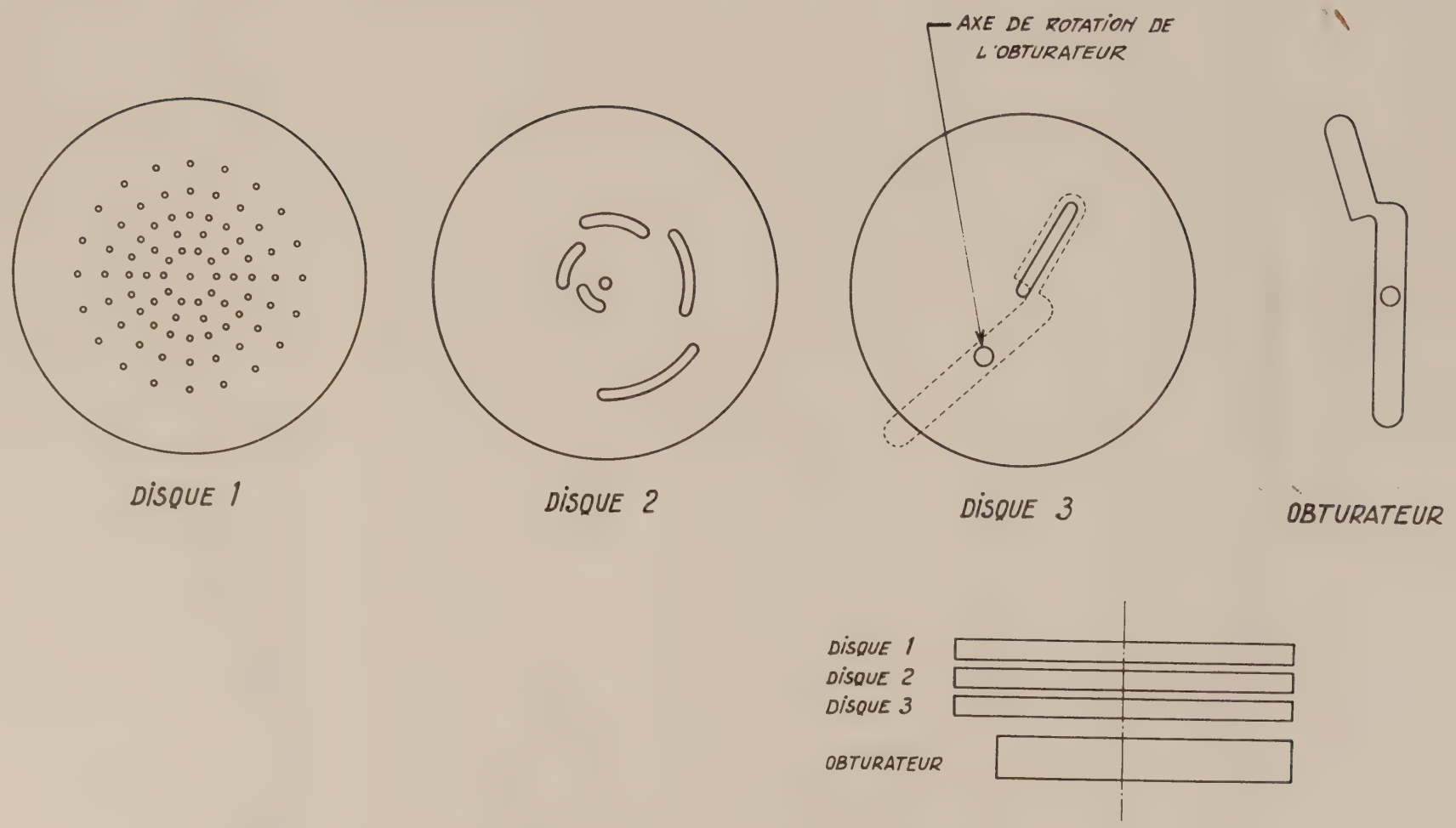


fig. 8

SÉLECTEUR DE SURFACE

II - 3 - SYSTEME D'EXPLORATION DE LA SURFACE DU FABRY-PEROT

Cet appareil assure lasélection de la portion de surface de l'étalon de Fabry-Perot à étudier. La figure 7 donne un diagramme de la chaîne des opérations effectuées pour réaliser l'exploration de la surface des lames.

A) Le sélecteur de surface

Les composants de base du sélecteur de surface sont 3 disques et un obturateur (figure 8).

La projection du disque n°1 sur les lames de F.P. donne les points des lames qui seront étudiés. Le disque contient 81 points: le centre, 20 points sur chacun des 3 cercles les plus extérieurs et 10 points sur chacun des 2 cercles interieurs. Les rayons des 5 cercles portant ces points sont respectivement 6, 11, 16, 22 et 29mm . On peut aisément échanger ce disque avec un autre disque ayant des trous d'un diamètre différent, mais toujours inférieurs à 2,5mm .

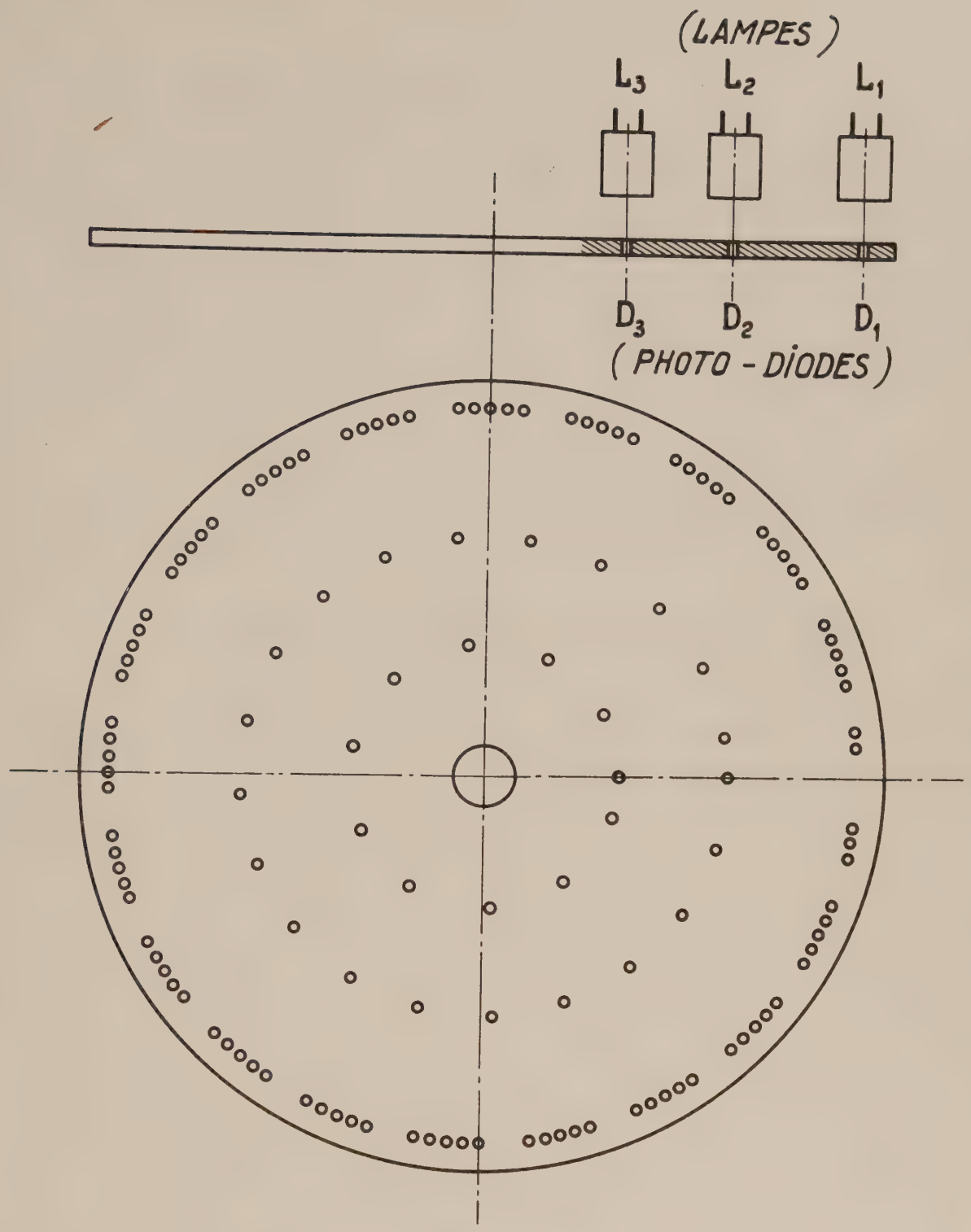
L'ordre des mesures est le suivant : la première mesure se fait sur le point central; puis le sélecteur isole successivement chacun des points des cinq cercles, dans le sens des aiguilles d'une montre et en partant du cercle extérieur. Chacune de ces cinq séries de mesures est toujours suivie d'une mesure sur le point central, cela permet de vérifier la stabilité du Fabry-Perot.

L'obturateur est fixé sur le disque 3 par l'intermédiare d'un axe autour duquel il peut pivoter. La sélection de la surface à étudier est assurée par les mouvements relatifs des disques 2 et 3 et de l'obturateur.

Pour changer de cercle : le disque 2 est bloqué pendant que le disque 3 tourne et l'obturateur est fermé.

Pour passer d'un point à un autre du même cercle : le disque 2 tourne avec le disque 3 pendant que l'obturateur reste ouvert.

Le disque 3 est relié par des engrenages à un moteur pas à pas.



DISQUE PROGRAMME

fig. 9

B) Le moteur pas à pas

Le moteur pas à pas (Superior SLO SYN MOTOR TYPE SS 50) effectue une révolution complète pour 100 impulsions. Ce moteur est relié au disque n°3 de telle façon qu'une révolution du moteur corresponde à une rotation de 18° du disque 3 . Cet angle est égal à l'angle entre deux points consécutifs des trois grands cercles du disque 1; 10 pas du moteur entraînent une rotation de 36° du disque 3, c'est l'angle entre deux points consécutifs des deux plus petits cercles.

Les impulsions qui provoquent l'avance pas à pas du moteur sont fournies par un dispositif auxiliaire : une photodiode est éclairée de façon intermittente par l'intermédiaire d'un disque programme.

C) Le disque programme et le moteur à courant continu

Le disque programme (figure 9) est monté sur l'axe d'un moteur à courant continu à vitesse lente. Sur le disque programme, il y a des trous répartis sur 3 cercles. Le plus petit cercle contient 11 trous, l'autre 21 et le plus extérieur 101 trous. A l'aplomb de chacun de ces cercles on a placé une lampe et une photodiode en regard de part et d'autre du disque.

C'est la photodiode D_1 qui produit les impulsions permettant de faire avancer le moteur pas à pas. Chaque fois qu'un trou du cercle extérieur du disque programme passe devant la photodiode D_1 , le moteur avance d'un pas. Au début de chaque balayage par variation de pression on fait démarrer le moteur à courant continu, les photodiodes D_2 et D_3 sont utilisées pour l'arrêter. Si on est en train d'éffectuer une mesure sur un des points des trois cercles extérieurs du sélecteur de surface du F.P., les lampes L_1 et L_2 sont allumées et c'est D_2 qui commande l'arrêt du moteur à courant continu. Pendant la mesure de points sur les deux plus petits cercles du sélecteur de surface du F.P., les lampes L_1 et L_3 sont allumées, c'est alors D_3 qui provoque l'arrêt du moteur à courant continu.

II - 4 - LES PICOAMPEREMETRES

Les sorties des deux photomultiplicateurs sont reliées à deux picoampéremètres qui ont été réalisés dans ce laboratoire. La constante de temps des appareils de mesure était toujours égale ou inférieure à 400 microsecondes. La sortie des picoampèremètres est connectée à la fois à un enregistreur et au système de conversion digitale.

II - 5 - L'ENREGISTREUR

L'enregistreur qui sert au contrôle est un système TEXAS INSTRUMENT à deux plumes. Il est utilisé pour vérifier que la tension de sortie est suffisante et pour mesurer le nombre de franges de Michelson dans un intervalle spectral libre de l'étalon de Fabry-Perot. Ce comptage est effectué pendant que le gaz carbonique pénètre dans la cloche du F.P., avant les mesures des différents points des lames.

II - 6 - LE SYSTEME DE CONVERSION DIGITALE

La sortie des picoampèremètres est reliée à un commutateur (SOLARTRON LU 1461). Le voltmètre digital donne alternativement les tensions de sortie du spectromètre F.P. et de l'interféromètre de Michelson. La sortie du SOLARTRON digital LM 14 20 2 est reliée à un encodeur (SOLARTRON LP 1131 2 PUNCH).

La vitesse maximum de mesure de ce système est de trois points par seconde.

II - 7 - LA PERFORATRICE

La sortie de l'encodeur SOLARTRON PUNCH est reliée à un"télétype CORPORATION" perforatrice de grande vitesse. Cet appareil perfore du ruban papier selon un code à 7 canaux.

II - 8 - PROCEDES EXPERIMENTAUX

Après avoir placé les lames dans la cloche et obtenu la pression désirée, tout le système est en état de marche sauf la perforatrice de ruban et le moteur à courant continu, on laisse fonctionner le système pendant environ trois quart d'heure avant d'éffectuer toute mesure. Ceci a pour but de laisser la température s'équilibrer dans la cloche. La température du laboratoire est contrôlée par un thermostat. Une carte est commencée par un enregistrement au point central des lames pendant un aller et retour de pression dans la cloche (compression, puis décompression). Ces enregistrements sont repris à la fin de la carte du Fabry-Perot.

On constate que si l'on éffectue une mesure pendant une décompression et si l'on éffectue la même mesure pendant une compression, la position de la fonction Fabry-Perot par rapport aux franges de Michelson n'est pas la même; mais en général, la différence entre ces deux positions est constante.

Toutefois dans le but de réaliser une carte des défauts d'épaisseur, il faut comparer l'épaisseur de chaque point des lames avec celle au centre des lames prise comme épaisseur de référence. Ainsi, si un point est mesuré pendant une compression, il doit être comparé à une mesure au centre qui a été faite pendant une compression.

L'appareil est construit de façon à pouvoir réaliser une carte soit d'une surface de 58mm de diamètre (ceci nécessite 88 balayages de pression, 8 étant éffectués au centre des lames) soit d'une surface de 44mm de diamètre (soit 67 balayages de pression dont 7 pour le centre des lames). Pour les grandes cartes il est nécessaire d'enregistrer environ 23 000 valeurs sur la bande papier et pour une petite carte 18 000 valeurs. L'enregistrement d'une valeur nécessite environ 2 cm de ruban de papier, une petite carte peut être enregistrée sur un seul rouleau de papier alors qu'une grande carte nécessitera l'arrêt des mesures pour changer de rouleau de papier. L'appareil et le programme de calcul sont conçus afin d'éffectuer facilement ce changement à la fin de n'importe quel balayage de pression.

Pendant que le sélecteur point par point change de position sur la surface du F.P., une tension négative est appliquée sur le voltmètre et enregistrée sur le ruban de papier. De cette manière le programme de calcul peut détecter la fin de chaque balayage. Ce système d'enregistrement des mesures est automatique, la présence continuelle de l'opérateur n'est plus nécessaire, ni souhaitable.

II - 9 - TEMPS TOTAL NECESSAIRE

Montage et réglage des lames	Réglage de la pression dans la cloche Attente de l'équilibre	Enregistrement des mesures	Marche à pied jusqu'au Centre de Calcul	Passage bande papier sur bande magnétique	Calculs
← 2h →	← 1h →	← 1,5h à 2h →	← 20mn* →	← 10mn →	← 3mn** →

* La marche doit être plus rapide s'il pleut, mais peut être beaucoup plus lente si le temps est beau.

** 3 minutes pour une carte de finesse, 9 minutes pour 2 cartes de finesse dont l'une calculée par convolution.

Comme on peut le voir, cinq heures sont nécessaires pour obtenir la carte désirée, et ceci suppose un service instantané du Centre de Calcul. Remarquons que quelle que soit la méthode utilisée il faut au minimum 3 heures pour obtenir une bonne stabilité du Fabry-Perot.

Les résultats imprimés par le calculateur sont assez nombreux car ils doivent permettre une localisation facile de toutes les erreurs qui ont pu se produire. Ce qui entraîne une perte de priorité sur le calculateur. En général il est nécessaire d'attendre deux heures les résultats du calculateur.

CHAPITRE III

EXPLOITATION DES DONNEES ET PRECISION

Un programme de calcul (pour UNIVAC 1107) appelé TSTFLT (Test of flatness) a été écrit pour analyser les résultats et pour imprimer à la fois une carte des défauts de planéité et une carte de finesse. Ce programme utilise les données numériques transférées sur une bande magnétique et une carte de données. La carte de données indique le nombre de points qui ont été mesurés sur les surfaces optiques, le sens de changement de pression lors du premier balayage et le nombre de franges de Michelson dans un intervalle spectral libre de l'étalon de Fabry-perot.

Un balayage par variation de pression (correspondant à une position du sélecteur point par point) dure environ 2 minutes. Pendant ce balayage, on enregistre au rythme de 3 valeurs par seconde les réponses provenant alernativement des photomultiplicateurs qui suivent le Fabry-Perot et le Michelson. Une carte complète nécessite 88 balayages par variation de pression. Dans tous les calculs, on suppose que la fréquence d'enregistrement est constante. Pour éliminer les erreurs grossières accidentelles, il n'est malheuresement pas possible de comparer les valeurs calculées à une valeur standard. Le principe fondamental de l'exploitation des données est de calculer chaque valeur par au moins deux méthodes différentes; si la différence entre ces deux valeurs est supérieure à un seuil choisi à l'avance, un message d'avertissement est imprimé.

III - 1 - POLYNOME DECRIVANT LA POSITION DES EXTREMUMS DES FRANGES DE MICHELSON

Dans cette étude on n'a jamais obtenu un défilement linéaire des franges de Michelson, c'est-à-dire que l'intervalle de temps entre deux maximums n'est pas constant. En général, les intervalles enregistrés après les

— DÉFAUT DE LINÉARITÉ DES FRANGES DE MICHELSON —

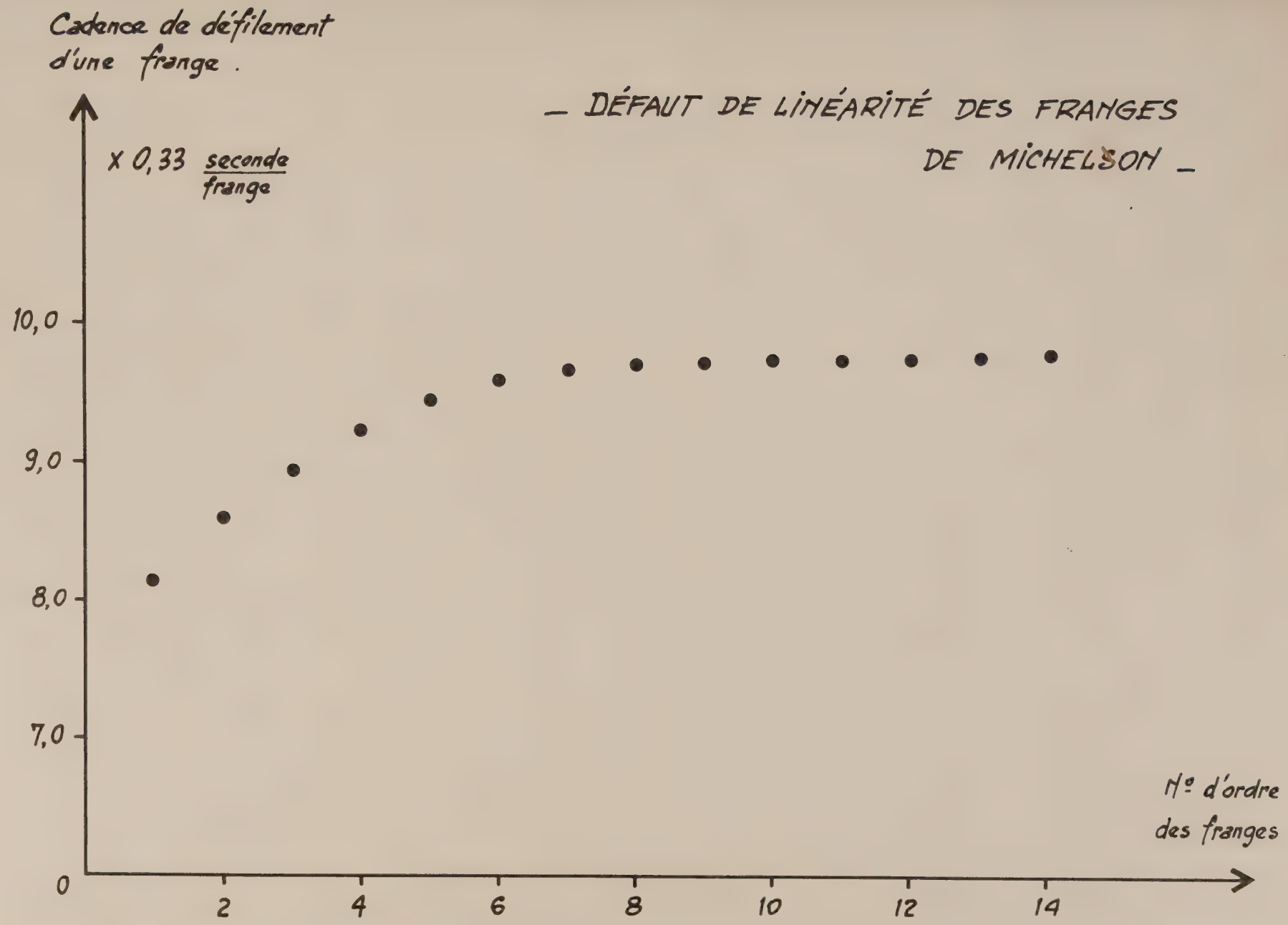


fig. 10

quatre premières franges du balayage sont constants à 3% près, mais une variation supérieure à 16% peut être observée entre la première et la dernière des franges enregsitrées au cours d'un balayage. La figure 10 montre le changement de la cadence de défilement d'une frange en fonction de son numéro d'ordre.

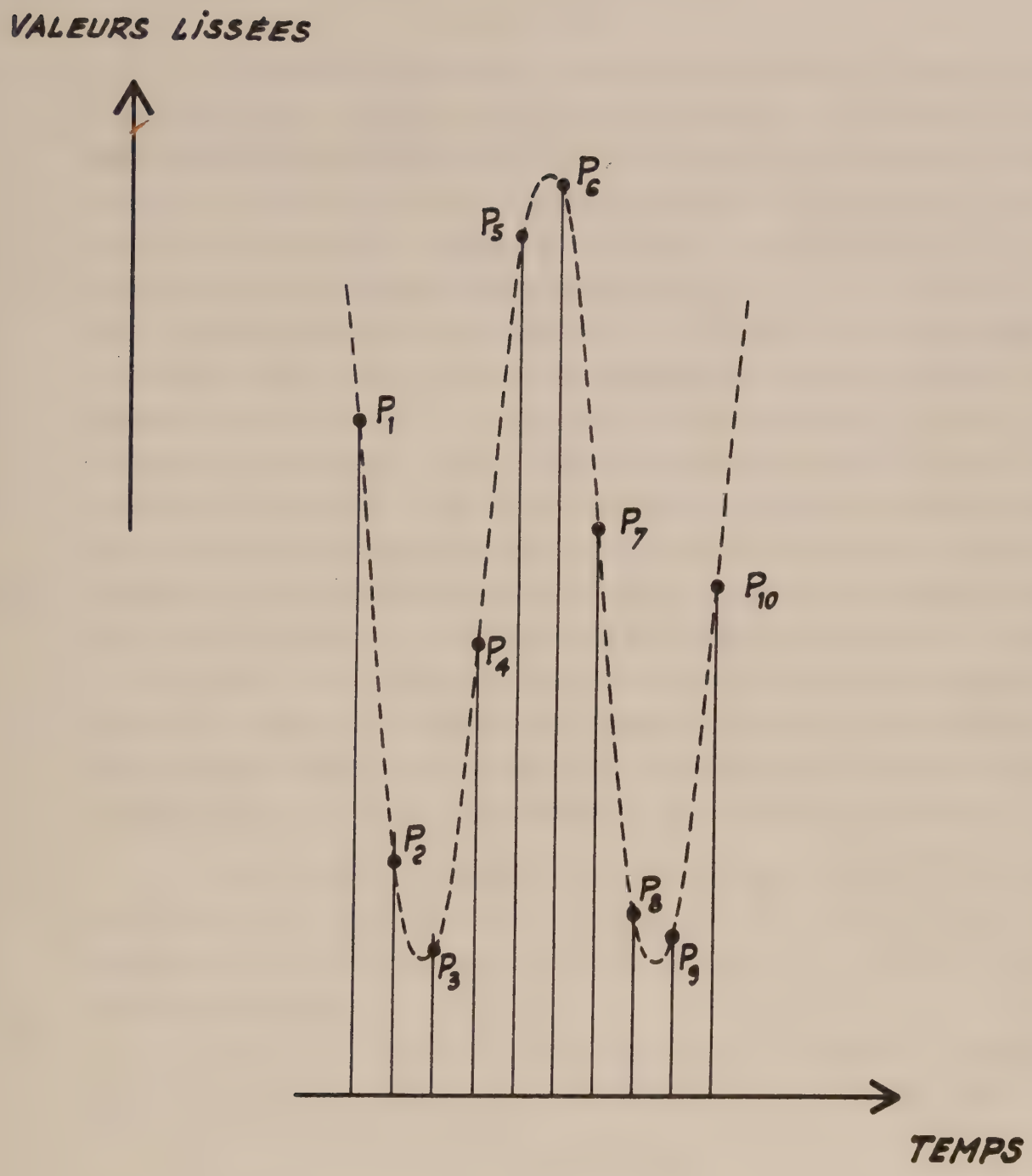
Dans ces conditions on calcule en fonction du temps les positions de chaque minimum et de chaque maximum des franges de Michelson. A partir de ces valeurs on calcule par une méthode de moindres carrés les coefficients représentant les positions de ces extremums.

A) Localisation des maximums et minimums

Le premier problème consiste à utiliser les résultats expérimentaux pour reconstituer les franges de Michelson. Les extremums sont repérés après lissage et dérivation. Il est aisé d'expliquer la méthode utilisée à l'aide d'un exemple. Si on désire lisser la valeur expérimentale P_{20}, on prendra les quatre valeurs les plus voisines (P_{18}, P_{19}, P_{21} et P_{22}) de P_{20}, P_{18} et P_{19} étant les deux valeurs expérimentales enregistrées immédiatement avant P_{20}, et P_{21} celles enregistrées juste après; en utilisant une méthode de moindres carrés on ajustera ces valeurs sur une équation du 2eme degré. Il sera alors possible de calculer d'après cette équation pour l'abscisse de temps correspondant à P_{20}, la valeur de P_{20} ainsi "lissée".

De plus on calculera pour l'abscisse correspondant à P_{20}, la dérivée de cette équation ainsi optimisée.

Pour le lissage et la différentiation de la valeur expérimentale P_{21}, on utilisera le même procédé mais avec les valeurs P_{19}, P_{20}, P_{22} et P_{23}. Cette méthode est appelée méthode de lissage et de différentiation à 5 points. Avec la vitesse de défilement des franges choisie, l'intervalle couvert par les 5 points ne comporte qu'un seul point d'inflexion. Une méthode extrêmement rapide utilisant la convolution a été décrite par SAVITZKY et GOLAY [21]. Cette méthode a été utilisée pour exploiter les données expérimentales provenant du Michelson.



FRANGES DE MICHELSON

fig. 11

Il reste à localiser la position des maximums et minimums qui sont déterminés par le changement de signe de la dérivée. La figure 11 montre les résultats expérimentaux lissés pour un maximum. Afin d'éffectuer la localisation du maximum avec la plus grande précision on procède de la façon suivante : On détermine le maximum de la parabole passant par P_3 , P_4 et P_5, puis le maximum de la parabole passant par P_2 , P_3 , P_4 . Une valeur MAX 1 est alors calculée en éffectuant la moyenne de ces deux maximums. On refait les mêmes opérations pour les maximums des paraboles passant respectivement par les points P_2 , P_4 et P_6 et les points P_1 , P_3 et P_5 . On obtient ainsi la valeur MAX 2 . La différence entre MAX 1 et MAX 2 est en général inférieure à 6% de l'intervalle de temps entre l'enregistrement de deux points expérimentaux. Puisque l'erreur maximum est de l'ordre de 6 centième du pas d'échantillonnage, et que la vitesse de balayage employée nous donne au minimum 7 points mesurés par frange du Michelson, le maximum ou le minimum est localisé avec une précision de l'ordre du centième de frange. La vitesse de changement de pression dans la cloche doit donc être relativement faible pour disposer d'un nombre suffisant de points expérimentaux afin de localiser avec précision les franges de Michelson.

On a étudié l'influence d'un accroissement de la vitesse de balayage. Pour ceci, des calculs ont été éffectués avec tous les points expérimentaux et puis avec seulement la moitié des points. Le tableau I donne les résultats obtenus.

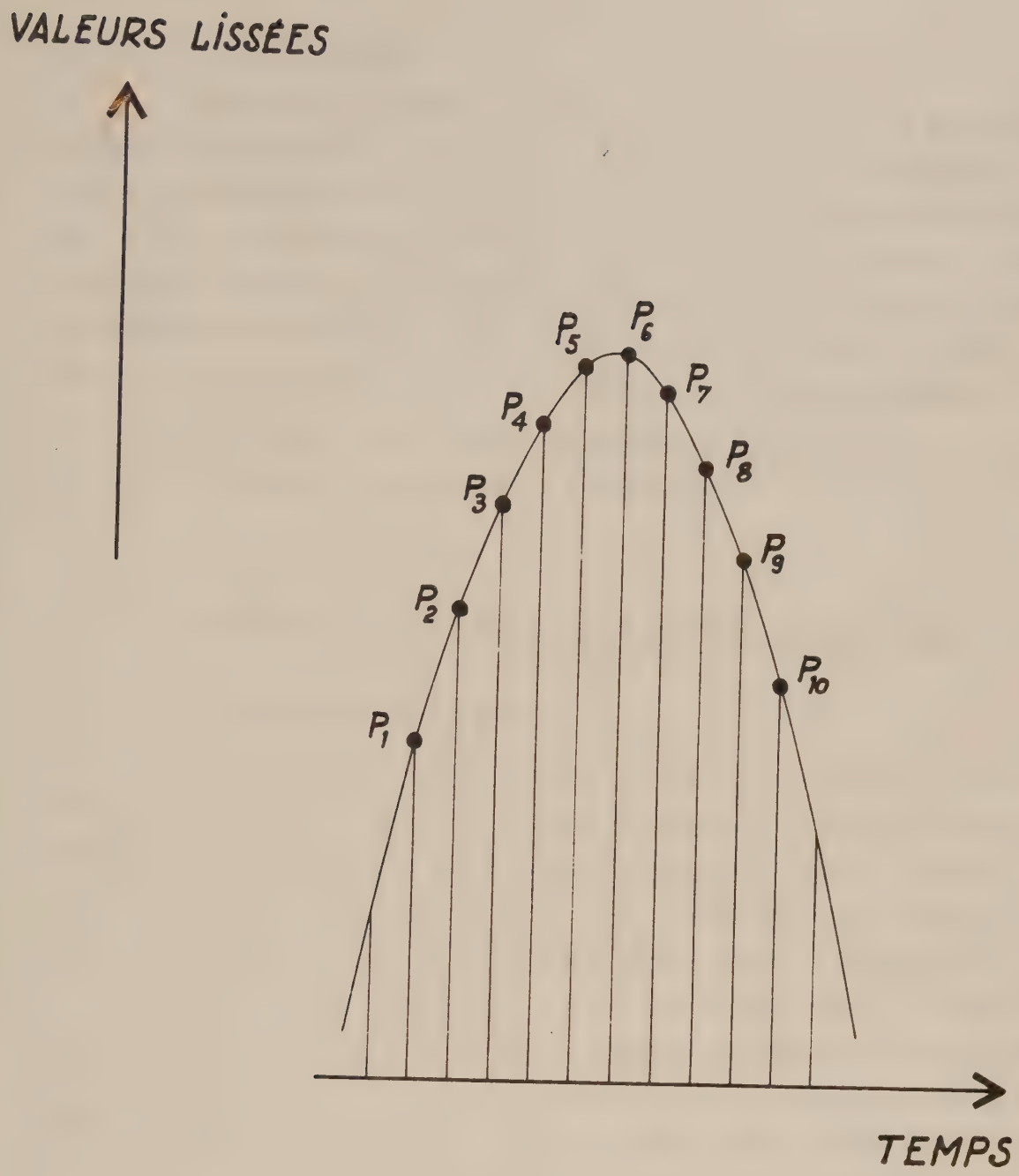
Un essai a été fait pour ajuster par la méthode des moindres carrés, aux résultats expérimentaux du Michelson, la fonction suivante :

$$A \cos^2 (f_n(t))$$

où $f_n(t)$ est un polynôme de degré n . Même avec une valeur de n aussi grande que 12 , l'accord n'était pas bon pour toutes les franges observées lors du balayage, mais dans la région linéaire, la position des pics calculée par cette méthode coïncidait à 5 centièmes du pas d'échantillonnage près, avec celle calculée par la méthode précédente.

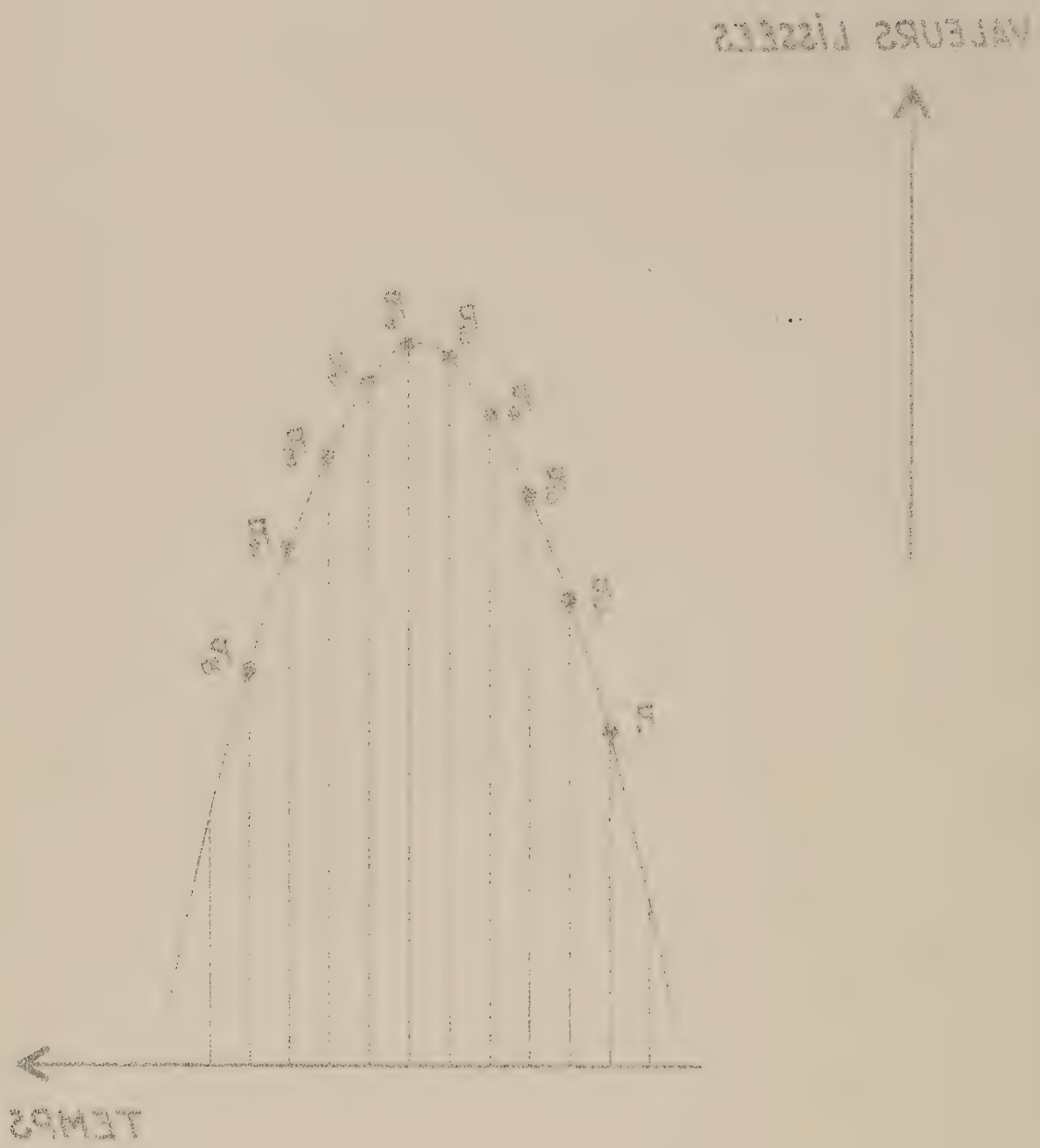
TABLEAU I

Frange	UTILISATION de tous les points expérimentaux		UTILISATION d'un point expérimental sur deux	
	Position	Incertitude	Position	Incertitude
0,0	7,141	0,040	7,133	0,190
0,5	10,927	-0,027	10,894	0,190
1,0	14,510	0,028	14,671	-1,272
1,5	18,260	0,004	18,517	-0,496
2,0	22,148	-0,005	22,357	-0,192
2,5	26,133	0,003	26,260	-0,202
3,0	30,150	0,045	30,357	-0,110
3,5	34,371	-0,055	34,424	-0,096
4,0	38,411	0,040	38,708	-0,124
4,5	42,717	0,007	42,826	0,018
5,0	46,971	-0,009	46,966	0,006
5,5	51,179	0,031	51,176	-0,052
6,0	55,593	0,006	55,490	0,044
6,5	60,039	-0,050	59,908	0,014
7,0	64,209	0,021	64,410	-0,044
7,5	68,554	0,036	68,782	-0,002
8,0	73,056	-0,017	75,068	-2,096
8,5	77,485	-0,017	77,341	-0,014
9,0	81,912	0,028	81,998	0,006
9,5	86,507	-0,025	86,687	-0,038
10,0	91,175	-0,004	91,118	-0,095
11,0	100,278	0,017	95,684	0,006
11,0	100,278	0,030	100,421	0,040
11,5	104,838	-0,009	104,876	0,064



FONCTION FABRY-PÉROT

fig. 12



FONCTION FABRY-PEROT

fig. 12

B) Le Polynôme

Après avoir localisé tous les maximums et tous les minimums des franges de Michelson, ces positions sont décrites par un polynôme en t ajusté par une méthode de moindres carrés. Le degré du polynôme peut varier de 1 à 5 . Le polynôme qui présente le plus petit écart type est alors pris pour donner la meilleure représentation des franges de Michelson. En général, un polynôme du 4ème ou 5ème degré donne le meilleur accord. L'écart type est généralement inférieur à trois millièmes du pas d'échantillonnage.

Ce polynôme sert ensuite de référence pour localiser la position du centre de gravité de la fonction Fabry-Perot.

III - 2 - DETERMINATION DE LA POSITION DE LA FONCTION FABRY-PEROT

A) La méthode de lissage

Cette méthode de localisation du pic Fabry-Perot est semblable à celle utilisée pour la localisation des maximums et minimums des franges de Michelson. Dans ce cas les dix valeurs enregistrées avant et après le passage par le sommet de la fonction F.P. sont lissées par une méthode de lissage à 15 points avec une équation parabolique selon la méthode de SAVITZKY et GOLAY [21]. Pour éffectuer ces calculs, on utilise les 17 valeurs consécutives situées de part et d'autre du maximum. La position du pic Fabry-Perot est alors localisée en calculant plusieurs fois la position du maximum de paraboles passant par un jeu de trois valeurs lissées. Comme le montre la figure 12, on éffectue les calculs pour 4 jeux de trois valeurs lissées qui sont respectivement (P_3 , P_5 et P_7), (P_4 , P_6 et P_8), (P_1 , P_5 et P_9) et (P_2 , P_6 et P_{10}).

L'incertitude sur la localisation du pic pour ces 4 calculs est en général inférieure à 10% du pas d'échantillonnage (intervalle de temps entre l'enregistrement de 2 valeurs successives).

B) Méthode d'ajustage par moindres carrés d'une fonction d'Airy

Il est bien connu que la fonction enregistrée d'un spectromètre Fabry-Perot est la convolution de plusieurs fonctions. Par conséquent le lissage d'une fonction d'Airy avec des valeurs expérimentales enregistrées n'a pas de signification physique. Cependant, comme la fonction enregistrée et la fonction d'Airy sont toutes deux symétriques, on a trouvé qu'un ajustage par une méthode de moindres carrés d'une fonction d'Airy avec des résultats expérimentaux constitue à la fois une méthode rapide, simple et précise pour la localisation du centre de gravité de la fonction enregistrée.

La fonction d'Airy $A(t)$ utilisée pour le calcul est la suivante:

$$A(t) = I \left[1 + F \sin^2 (\pi (f_n(t) - f_n(t_o))/\Delta\sigma \right]^{-1}$$

où : $\Delta\sigma$ est l'intervalle spectral libre exprimé en nombre de franges de Michelson

$f_n(t)$ est le polynôme représentant les franges de Michelson

$f_n(t_o)$ est le même polynôme calculé au temps t_o où le maximum de la fonction apparaît.

On réalise l'accord grâce aux variables libres qui sont I , F et t_o . La valeur de $f_n(t_o)$ donne alors la position du pic de la fonction Fabry-Perot. La position trouvée par ce procédé de moindres carrés diffère en général de moins de 0,05 frange de Michelson de celle calculée par la méthode de lissage à 15 points. Parfois, une différence de 0,15 frange de Michelson a été constatée, dans ce cas, la fonction enregistrée n'était pas symétrique.

III - 3 - DETERMINATION DE LA FINESSE EFFECTIVE

La valeur de la finesse éffective peut être calculée très rapidement en mesurant à la fois la largeur à mi-hauteur de la fonction enregistrée et l'intervalle spectral libre de l'étalon. Le rapport de l'I.S.L. par la largeur à mi-hauteur est par définition la finesse éffective. Ce calcul peut être réalisé très facilement si le profil entier de la fonction F.P. entre les points à mi-hauteur est enregistré. Mais dans le cas de lames de planéité médiocre, très souvent on n'enregistre pas la totalité du profil utile. Par conséquent, la finesse doit être calculée par d'autres procédés.

A) Calcul par la fonction d'Airy

Dans le calcul pour ajuster une fonction d'Airy aux résultats expérimentaux, une des variables est F . Comme on le sait la finesse , N , est donnée par :

$$N = \frac{\pi}{2}\sqrt{F}$$

On a trouvé que cette valeur de la finesse est toujours de 2 à 3 pour cent inférieure à celle mesurée directement. La valeur ci-dessus de N a été utilisée pour mesurer la finesse éffective.

B) Méthode d'ajustage par moindres carrés d'une fonction Fabry-Perot convoluée

HERNANDEZ [22] a donné l'expression mathématique de la réponse par un spectromètre au profil spectral d'une raie atomique. Cette expression, Y , est la convolution du profil source B et de la fonction d'appareil W

$$Y = B * W$$

D'une part le profil de source B est la convolution d'une fonction de Lorentz L représentant la forme naturelle de la raie, avec une fonction de Gauss , G , représentant l'élargissement Doppler dans la source.

Et d'autre part, la fonction instrumentale W est le produit de composition d'une fonction d'Airy A par les fonctions suivantes : une fonction défaut de micro poli D_g , une fonction D_f tenant compte des défauts de courbure sphérique et du mauvais réglage des lames et enfin une fonction F dépendant de la forme et des dimensions du diaphragme isolateur. Ainsi :

$$Y = L * G * A * D_g * D_f * F$$

Détaillons les expressions des fonctions apparaissant dans ce produit de composition.

$f_n(t)$ étant le polynôme représentant les franges de Michelson. Toutes les fonctions ont leur pic centré symétriquement par rapport au temps $t = t_o$.

La fonction d'Airy est :

$$A(t) = \{ 1 + 4R(1-R)^{-2} \operatorname{Sin}^2[\pi(f_n(t) - f_n(t_o)/\Delta\sigma]\}^{-1}$$

ou R est le facteur de reflexion et $\Delta\sigma$ l'intervalle spectral libre.

La fonction de Gauss est :

$$G(t) = \exp [- 4 \operatorname{Log}_e 2 (f_n(t) - f_n(t_o))^2 /\Delta_G^2]$$

ou Δ_G est la largeur à mi-hauteur.

La fonction de Lorentz est :

$$L(t) = [1 + (f_n(t) - f_n(t_o))^2 /(\Delta_L/2)^2]^{-1}$$

ou Δ_L est la largeur à mi-hauteur.

Dans le cas d'un diaphragme circulaire la fonction diaphragme est :

$$F(t) = \begin{cases} 1 & \text{pour } t_o - \frac{1}{2}\Delta_F \leqslant t \leqslant t_o + \frac{1}{2}\Delta_F \\ 0 & \text{pour toutes les autres valeurs de } t \end{cases}$$

et $$\Delta_F = \frac{\sigma\, d\, \Omega}{2\pi}$$

ou $d\Omega$ est l'angle solide sous-tendu par le diaphragme vu du condenseur du spectromètre.

La fonction D_g représentant le micropoli des lames est une fonction de Gauss ou Δ_D est la largeur à mi-hauteur, alors que le défaut de courbure sphérique ainsi que le mauvais réglage des lames est représenté par une fonction créneau D_f de largeur Δ_S. Pour réaliser le calculs, ces deux fonctions D_g et D_f n'ont pas été introduites. Dans ces conditions il faut redéfinir l'expression du facteur de reflexion et les défauts ignorés se troduisent par un changement du facteur de reflexion [23].

HERNANDEZ a montré que :

$$Y(t_j) = \frac{1}{2} + \sum_{m=1}^{m\,max} (R\, e^{-\ell})^m \exp(-\, m^2 g^2/4)\ \mathrm{Sinc}\,[2\, m\, \Delta_F\, \Delta\sigma^{-1}]\ \cos m\, x_j$$

avec

$$\mathrm{sinc}\,[\,2\, m\, \Delta_F\, \Delta\sigma^{-1}] = \sin\,[2\, m\, \Delta_F\, \Delta\sigma^{-1}]\ /\ 2\, m\, \Delta_F\, \Delta\sigma^{-1}$$

$$x_j = \pi\,(f_n(t_j) - f_n(t_o))/\Delta\sigma$$

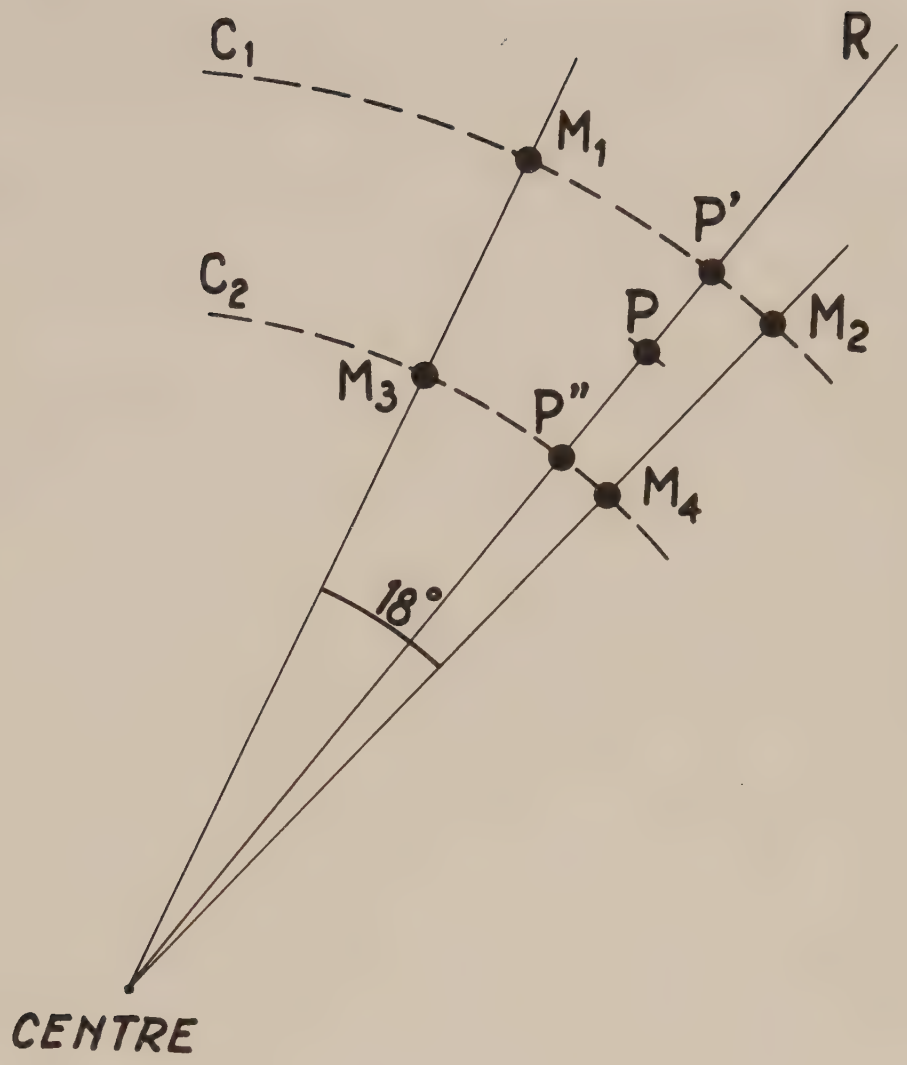
$$\ell = \pi\,(\Delta_L)\ /\ 2\,\Delta\sigma$$

$$g = \pi\,(\Delta_G)\ /\ [\,2(\mathrm{Log}_e\, 2)^{\frac{1}{2}}\,\Delta\sigma\,]$$

La valeur de m_{max} est déterminée de telle façon que la valeur du terme $m_{max} + 1$ dans la série est inférieur à 10^{-5}.

La normalisation choisie est telle que $Y(t_o) = 1$ alors

$$Y(t_j) = \frac{1\ [\,\frac{1}{2} + \sum_{m=1}^{m\,max} (R\, e^{-\ell})^m \exp(-\, m^2\, g^2/4)\ \mathrm{sinc}(2\, m\, \Delta_F\, \Delta\sigma^{-1}) \times \cos m\, x_j}{\frac{1}{2} + \sum_{m=1}^{m\,max} (R\, e^{-\ell})^m \exp(-\, m^2\, g^2/4)\ \mathrm{sinc}(2\, m\, \Delta_F\, \Delta\sigma^{-1})}$$



MÉTHODE D'INTERPOLATION

fig. 13

La valeur Δ_G est déterminée par une étude paramétrique et sa valeur est ensuite fixée.

Cette fonction est ajustée par une méthode de moindres carrés sur la fonction Fabry-Perot enregistrée.

Les variables sont alors $Y(t_o)$, R et t_o . L'accord est en général excellent.

La finesse est alors définie par l'expression suivante :

$$N = \pi (R)^{\frac{1}{2}} / (1-R)$$

Maintenant ceci ne représente plus exactement la finesse reflectrice, car dans R interviennent le facteur de reflexion et les défauts de surface; sa variation doit être semblable à la variation de finesse effective.

En outre, on peut utiliser ce calcul pour déterminer la position du maximum de la fonction Fabry-Perot. Cette valeur diffère en général de moins de cinq centièmes du pas d'échantillonnages de la valeur trouvée dans le calcul à l'aide d'une simple fonction d'Airy.

III - 4 - LES CARTES

Le sous programme pour tracer les courbes de niveau nécessite 8640 valeurs. Il y a seulement 81 valeurs déterminées expérimentalement. Les autres valeurs sont obtenues par interpolation suivant la méthode ci-dessous. Si on désire interpoler pour trouver la valeur au point P comme le montre la figure 13, une première interpolation linéaire est réalisée le long de la circonférence C_1 entre les valeurs mesurées M_1 et M_2 et la valeur en P' est déterminée; ensuite la valeur en P" est déterminée par interpolation linéaire le long de la circonférence C_2 entre les points expérimentaux M_3 et M_4 . La valeur de P est alors interpolée le long du rayon R entre les valeurs P' et P" .

CHAPITRE IV

CORRECTIONS APPLIQUEES

IV - 1 - LA CORRECTION DU CENTRE

Si on effectue pendant plusieurs heures la mesure de l'épaisseur de l'étalon de Fabry-Perot en un point de la surface des lames, on s'aperçoit que l'épaisseur peut varier. En général ce changement est inférieur à $\lambda/300$ pour une période de deux heures, mais des variations de $\lambda/100$ ont été observées. Cet effet a en principe trois causes.

Si la température de la cale cylindrique placée entre les lames change, on aura une modification de l'épaisseur optique. Dans le cas d'une cale en invar d'épaisseur 4mm, une variation de 1°C entraîne un changement d'épaisseur de $\lambda/140$.

Si la température du bras de référence de l'interféromètre de Michelson varie, le volume de ce bras change. Par conséquent la densité du gaz contenu dans ce bras varie. Un changement de température de 1°C dans le bras de référence de longueur 290mm se traduira par une variation effective de l'épaisseur de $\lambda/15\ 000$.

De même, un déplacement de la position de la monture de l'étalon ainsi qu'un changement de position des miroirs M_1 et M_2 (figure 4) se traduiront comme un changement effectif de l'épaisseur de l'étalon.

Afin de pouvoir tenir compte de ces variations accidentelles d'épaisseur, l'épaisseur au centre des lames est mesurée 8 fois. Rappelons que l'épaisseur au centre est mesurée pendant une compression et une décompression au commencement et à la fin du cycle de mesures et elle est, en outre, mesurée deux fois pendant la compression et deux fois pendant le décompression dans le cours du cycle des mesures.

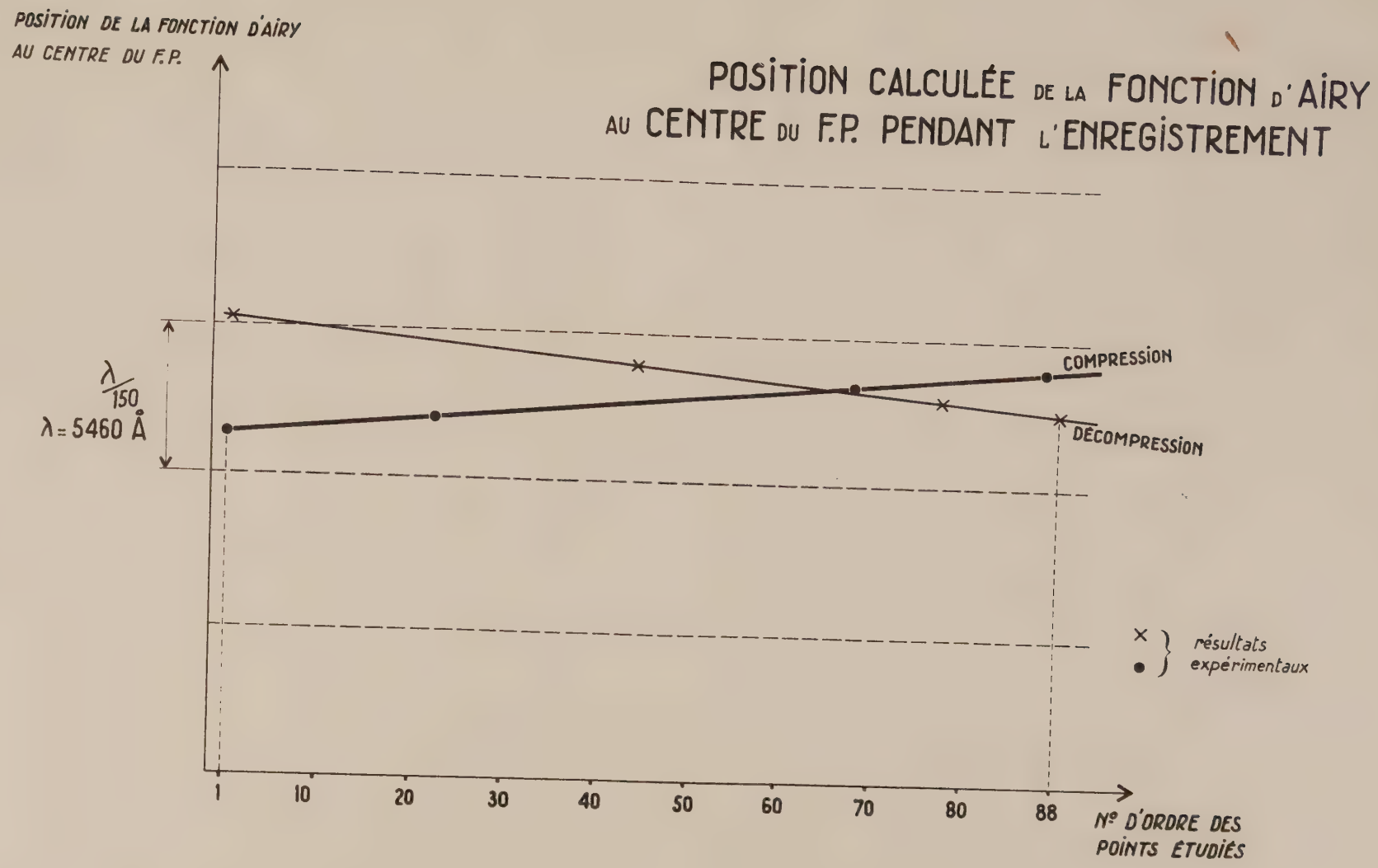

POSITION CALCULÉE DE LA FONCTION D'AIRY
AU CENTRE DU F.P. PENDANT L'ENREGISTREMENT
POSITION DE LA FONCTION D'AIRY
AU CENTRE DU F.P.
λ/150
λ = 5460 Å
COMPRESSION
DÉCOMPRESSION
× } résultats
• } expérimentaux
1
10
20
30
40
50
60
70
80
88
N° D'ORDRE DES
POINTS ÉTUDIÉS

fig. 14

Si on suppose que la moyenne des positions des fonctions Fabry-Perot par rapport aux franges du Michelson mesurées pendant une compression et pendant une décompression est une constante, on connaît alors 8 valeurs pendant la compression et 8 valeurs pendant la décompression. Des polynômes sont ajustés à ces deux jeux de 8 points comme le montre la figure 14 et on peut alors calculer l'épaisseur correcte au centre correpondant à chacun des 80 balayages. Dans le tracé des cartes des défauts de planéité on prend comme épaisseur de référence l'épaisseur au centre du Fabry-Perot. Pour chacun des 80 balayages on éffectuera la différence entre l'épaisseur mesurée et l'épaisseur de référence corrigée.

Quand on mesure un seul point de l'étalon 80 fois, alors que l'on effectue 8 fois la mesure du centre, si on applique la correction ci-dessus, on trouve que toutes les valeurs mesurées ne diffèrent pas de plus de $\pm \lambda/1500$.

IV - 2 - LOCALISATION DES FRANGES DE REFERENCE DU MICHELSON

Quand on effectue une carte des défauts de planéité, il faut mesurer la position de la fonction F.P. par rapport aux franges de référence du Michelson pour quelques points répartis sur la surface des lames. Ensuite on compare ces mesures à l'épaisseur au centre des lames. Quand la température du gaz contenu dans la cloche de l'étalon change, la position des franges de référence dans le balayage est également modifiée.

Dans le programme FORTRAN, la position des franges de référence est localisée grâce aux informations suivantes.

1) L'instant ou la première frange de Michelson apparaît dans le balayage.

2) L'intensité de cette frange (savoir s'il s'agit d'un maximum ou d'un minimum).

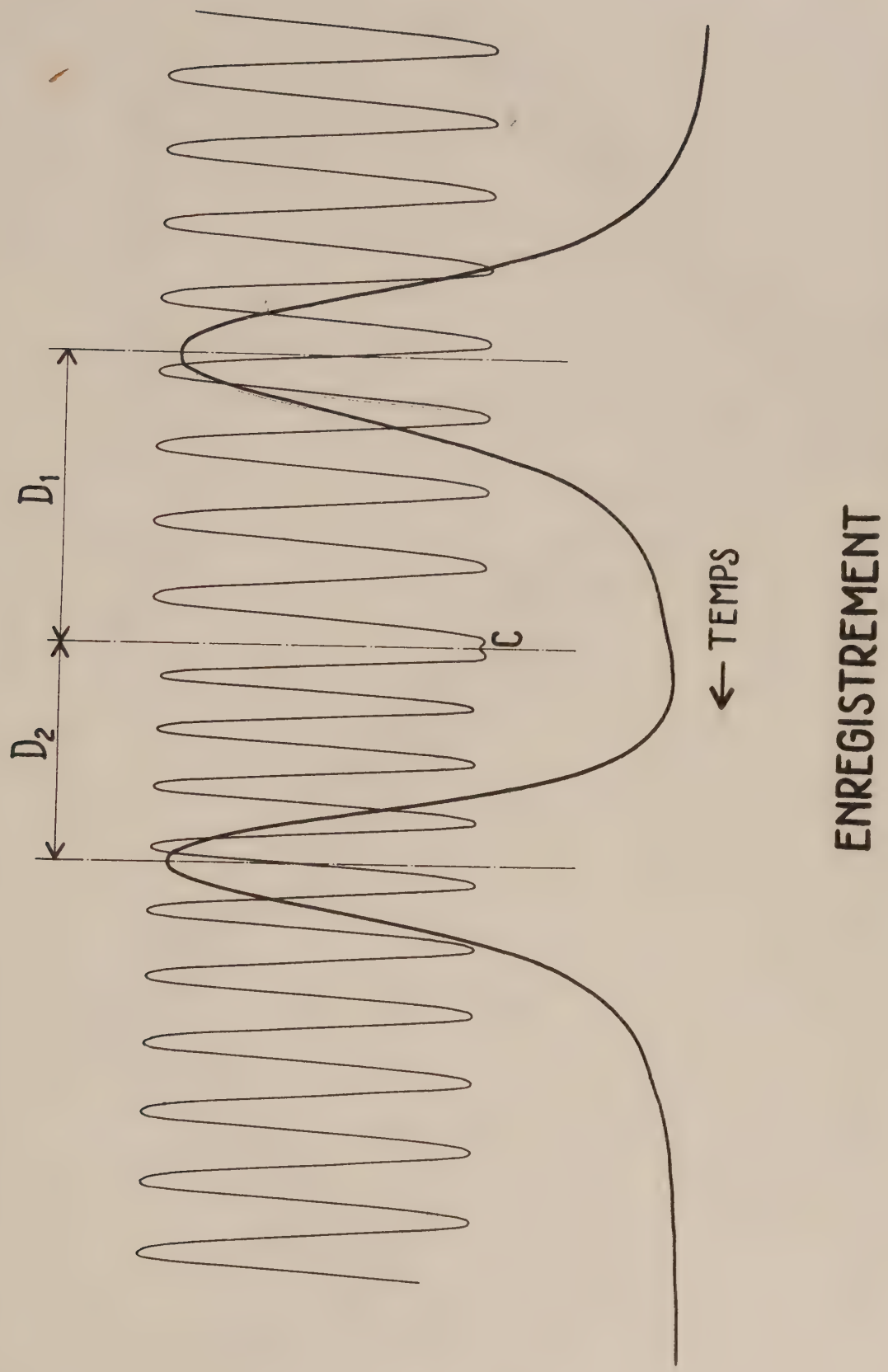


fig. 15

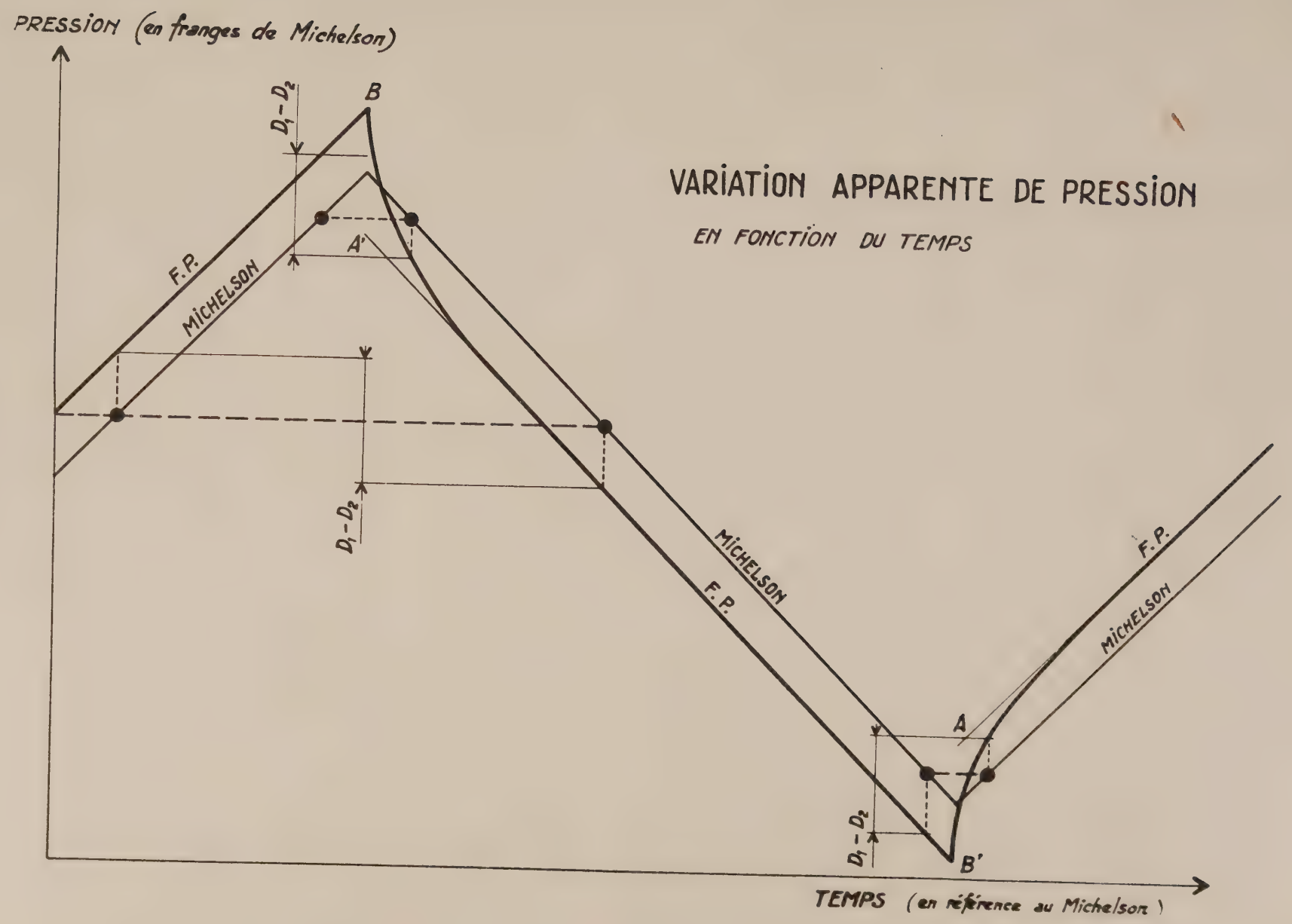

VARIATION APPARENTE DE PRESSION
EN FONCTION DU TEMPS
PRESSION (en franges de Michelson)
TEMPS (en référence au Michelson)
B
A'
A
B'
$D_1 - D_2$
$D_1 - D_2$
$D_1 - D_2$
F.P.
MICHELSON
MICHELSON
F.P.
F.P.
MICHELSON

fig. 16

3) Le nombre de valeurs recueillies pendant le balayage par variation de pression.

En comparant ces informations avec celles préalablement recueillies lors du balayage précédent, on localise une frange de Michelson qui sert de référence.

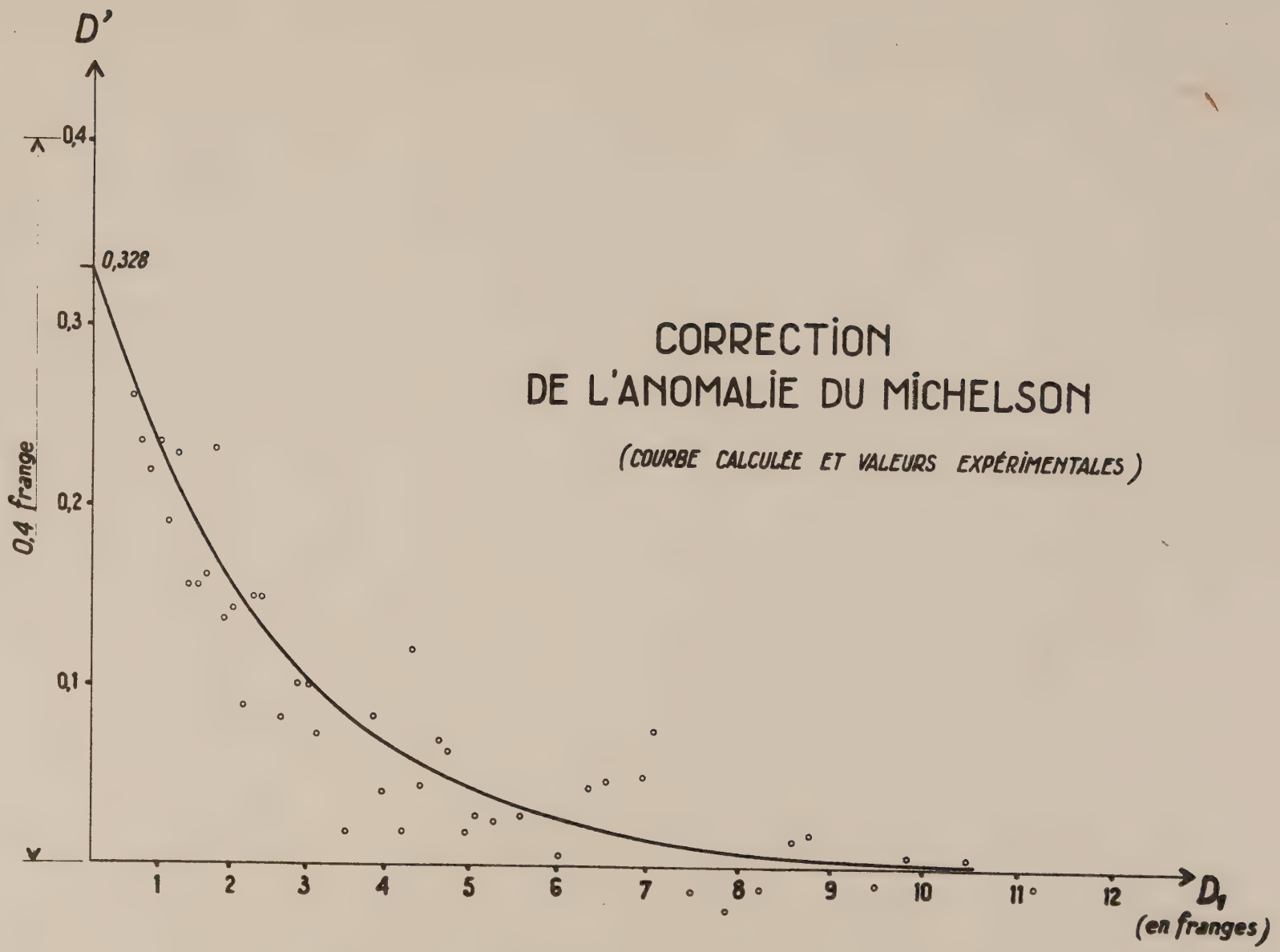
IV - 3 - ANOMALIE DU MICHELSON

Durant le cours de cette étude, nous nous sommes aperçus que lorsque la fonction F.P. apparaissait près du commencement d'un balayage de pression, les épaisseurs mesurées du F.P. et les finesses mesurées étaient différentes de celles mesurées quand la fonction F.P. était enregistrée vers la fin du balayage de pression. La variation de finesse peut être de l'ordre de 13% et elle est toujours plus grande quand la fonction F.P. se produit au début du balayage de pression. Ceci entraîne une erreur de $\lambda/1000$, cette erreur est donc importante et systématique.

Une série d'études a été faite et les distances D_1 et D_2 ont été mesurées en nombre de franges comme le montre la figure 15. Le sens de la variation de pression est changé au point C . On a montré que D_2 est toujours inférieur à D_1 , mais que sa valeur est proche de D_1 lorsque D_1 tend vers zéro.

Tout se passe comme si la pression dans le bras ouvert du Michelson variait avec un certain retard par rapport à celle entre les lames de l'étalon de F.P. . La variation de pression est représentée sur la figure 16.

Des essais ont été faits pour modifier l'appareil afin d'éliminer cet effet. La distance entre l'étalon et l'interféromètre de Michelson a été modifiée. Les lames du F.P. ont été montées de façon que l'espace entre les lames soit directement en regard de l'ouverture du bras du Michelson. On a fait rentrer le gaz dans la cloche en envoyant directement le gaz dans le bras ouvert du Michelson. Tous ces essais n'ont pas donné d'effet mesurable sur le défaut des mesures signalé ci-dessus.



CORRECTION
DE L'ANOMALIE DU MICHELSON

(COURBE CALCULÉE ET VALEURS EXPÉRIMENTALES)

fig. 17

Une explication possible est qu'il existe un gradient de pression à travers le bras ouvert du Michelson, perpendiculairement à la grande longueur du bras; et quand le sens du balayage de pression change, la pente de ce gradient change. Ceci a pour effet de déplacer l'image des franges de Michelson dans le plan focal de la lentille de sortie. Comme conséquence, le photomultiplicateur ne serait pas seulement sensible à la vitesse de la variation d'indice de réfraction du gaz, mais enregistrerait aussi le mouvement de l'image.

Nous n'avons pas encore trouvé comment modifier l'appareil afin d'éliminer cet effet, aussi avons nous décidé d'apporter une correction à nos mesures. On peut corriger la position de la fonction Fabry-Perot afin de suivre toujours les courbes A B et A'B' comme le montre la figure 16.

Pour ceci la différence $D_1 - D_2$ a été mesurée pour environ 100 différentes positions relatives de la fonction F.P. par rapport aux franges de Michelson. Cette différence est constante pendant environ 40% du temps d'un balayage par variation de pression. Cette valeur constante a été déterminée et été soustraite des 100 valeurs mesurées. On obtient ainsi les valeurs de D'. Une courbe donnant D' comme une fonction de D_1 exprimé en temps sous la forme d'un nombre de franges de Michelson montre une variation exponentielle. Un ajustage par moindres carrés des valeurs de D' avec une fonction exponentielle donne la courbe tracée sur la figure 17 et la fonction

$$E(t) = 0{,}328\ e^{-0{,}0485t}$$

t est exprimé en nombre de pas d'échantillonnage.

Quand cette fonction est soustraite du polynôme donnant les franges du Michelson, une fois les calculs faits, les différences systématiques observées sur la finesse et sur la position de la fonction F.P. disparaissent.

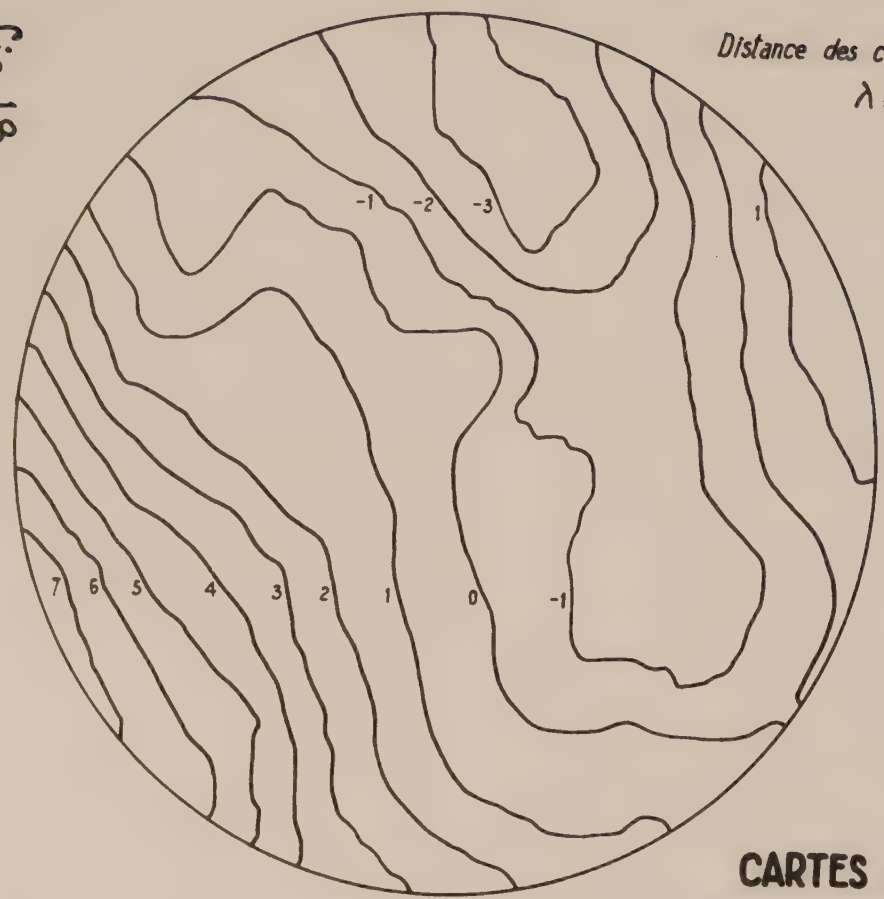
fig. 18

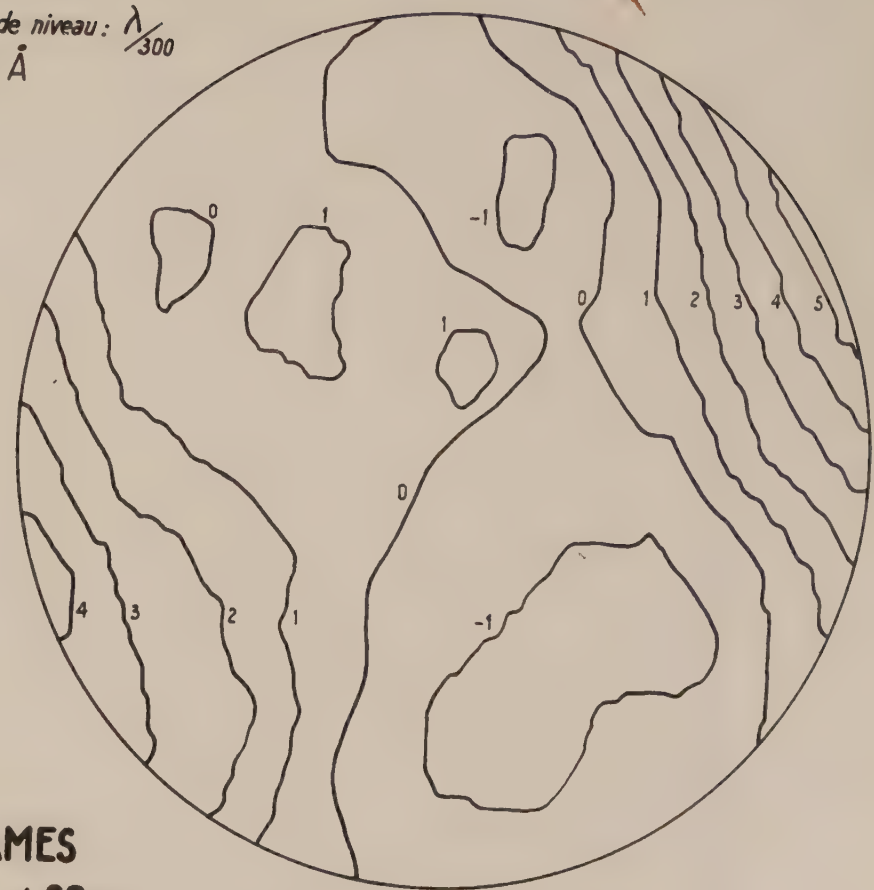
SANS RÉGLAGE

Distance des courbes de niveau : $\lambda/300$

$\lambda = 5460$ Å

AVEC RÉGLAGE (par calcul)





CARTES DE LAMES
DE FABRY-PÉROT ϕ 60 MM

IV - 4 - MODIFICATION DU PLAN DE REFERENCE DES COURBES DE NIVEAU

Lorsqu'on effectue deux fois la même série de mesuressur les mêmes lames, il est pratiquement impossible d'obtenir le même réglage de parallèlisme. Pour pouvoir faire des comparaisons précises entre deux cartes obtenues, il est nécessaire d'éliminer les différences de réglagepar le calcul, en ajoutant à l'épaisseur mesurée une correction, fonction linéaire des coordonnées dans le plan des lames.

Le critère de réglage choisi est tel que les épaisseurs du F.P. aux quatre points cardinaux, soient égales deux à deux sur un même diamètre. La figure 18 représente une carte des courbes de niveau telle qu'elle a été mesurée, et la même carte après réglage par le calcul.

CARTE DE LAME DE F.P. ϕ46 MM

DISTANCES DES COURBES DE NIVEAU : $\frac{\lambda}{150}$

$\lambda = 5460$ Å

fig. 19

CHAPITRE V

QUELQUES RESULTATS

Compte tenu de toutes les corrections effectuées, on peut estimer la reproductibilité d'une mesure à $\lambda/3000$ (épaisseur en un point). Comme il faut effectuer la différence de deux mesures pour obtenir un point d'une carte de lames, la reproductibilité est donc de l'ordre de :

$$2 \times \frac{\lambda}{3000} = \frac{\lambda}{1500}$$

Les résultats, indiqués dans le tableau ci-dessous, ont été obtenus en utilisant des lames dont la planéité est de l'ordre de $\lambda/30$ sur une surface de 46mm de diamètre. Une carte de ces lames est donnée sur la figure 19. La distance entre les lames était 3,75mm.

Au cours de plusieurs séries de mesures éffectuées avec ces mêmes lames, on a obtenu, pour la différence maximale entre deux cartes, les valeurs suivantes :

a) Mesures éffectuées à 2 heures d'intervalle, sans toucher aux lames entre temps - $\lambda/1500$

b) Mesures éffectuées à 1 jour d'intervalle, sans toucher aux lames entre temps - $\lambda/700$

c) Mesures éffectuées en des points différents de la lame Fabry-Perot sans toucher aux lames entre temps - - - - - - - - $\lambda/750$

d) Entre les mesures l'étalon a été démonté puis remonté - - - $\lambda/300$

On peut remarquer que le résultat a) est tout à fait en accord avec la reproductibilité estimée en tenant compte de la validité des corrections éffectuées. Par contre il est évident que les performances des résultats b) et c) sont liées à la qualité des lames de F.P. utilisées.

Nous avons effectué des mesures sur des lames dont la planéité est de l'ordre de $\lambda/180$; on a obtenu à deux jours d'intervalle, après avoir réglé à nouveau le parallèlisme des lames, une reproductibilité de $\lambda/1250$.

Si l'on démonte l'étalon entre deux mesures, les différences observées entre les cartes donnent alors une idée de l'ordre de grandeur des déformations dues aux contraintes mécaniques. L'importance de la déformation est essentillement fonction de la qualité de la cale cylindrique qui est placée entre les lames : Il est très difficile d'ajuster la longueur des trois touches d'une cale en invar de telle façon qu'elles ne diffèrent pas plus de $\lambda/2$ et des vis de réglage comprimant les touches sont nécessaires pour obtenir un parallèlisme correct des lames. La réalisation de cales en silice avec l'adhérence optique sur les lames présente de plus grandes difficultés techniques, par contre l'égalité des trois touches peut être réalisée avec une précision beaucoup plus grande, ce qui rend l'emploi des vis de réglage pratiquement inutile.

Des mesures systématiques de défaut de planéité d'interféromètre à cales de silice adhérées optiquement sont actuellement en cours.

Un essai a été fait pour effectuer des cartes de lames sans revêtement reflecteur. Pour ceci 28 franges de Michelson ont été balayées par variation de pression. Le contraste de la fonction F.P. enregistrée était de l'ordre de 3% . L'incertitude dans les cartes obtenues était de l'ordre de $\lambda/150$.

La figure 20 représente les courbes de niveau, ainsi qu'une carte de finesse d'une paire de lames de F.P. . En général, les contours d'une carte de finesse ne sont pas aussi nets que ceux d'une carte des courbes de niveau, car il y a une incertitude d'environ 4% dans la mesure de la finesse.

fig. 20

CARTE DE F.P. (SANS RÉGLAGE)

Distance des courbes de niveau : $\frac{\lambda}{300}$

$\lambda = 5460$ Å

CARTE DE FINESSE

(Calculée d'après fonction d'Airy)

CARTE DE FINESSE

(Calculée par convolution)

CARTES DE LAMES DE FABRY-PÉROT ϕ 46 MM

CONCLUSION

Dans cette étude, nous nous étions donné pour but la réalisation d'un appareil permettant d'obtenir avec une très grande précision des cartes de défaut de planéité de l'interféromètre de Fabry-Perot.

Nous avons choisi, parmi les méthodes connues, celle décrite par GERSTENKORN, DUONG et HELBERT; en effet de par son principe elle est indépendante des conditions d'éclairement et des inhomogénéités de finesse réflectrice des lames de l'interféromètre.

La mesure de l'épaisseur en un point de la surface des lames s'effectue en réalisant un balayage par pression pour enregistrer simultanément la fonction Fabry-Perot et les franges données par un interféromètre de Michelson, qui servent au repérage de la pression. Les mesures sont faites en 81 points différents du Fabry-Perot; elles sont effectuées l'une après l'autre grâce à un système d'exploration point par point dont l'avance est commandée à la fin de chaque balayage pression. Les mesures effectuées par un voltmètre électronique sont reportées sur un ruban papier, pour être utilisées par un ordinateur UNIVAC 1108.

L'appareil ainsi rendu automatique, la deuxième partie de ce travail consiste à exploiter les résultats obtenus pour obtenir un tracé de la carte de lames.

Il était nécessaire d'éliminer le bruit d'origine photoélectrique et les erreurs dues à des perforations accidentelles. Un programme de calcul en Fortran V a été mis au point pour obtenir, avec le maximum de précision, les grandeurs cherchées, à savoir la position de chaque fonction Fabry-Perot par rapport aux franges de référence du Michelson.

Enfin nous avons cherché à éliminer par le calcul toutes les causes d'erreurs d'origine expérimentale.

L'erreur dûe au défaut de linéarité du balayage pression a pu être éliminée en calculant pour chaque balayage la position des extremums des franges de Michelson, ce qui permet de corriger la fonction Fabry-Perot enregistrée.

Pour obtenir une carte des défauts de planéité, il faut comparer l'épaisseur mesurée en chaque point à celle mesurée au centre des lames choisi comme point de référence. Pour éliminer l'erreur due à une dérive thermique du Fabry-Perot, l'épaisseur au centre est mesurée plusieurs fois pendant l'enregistrement de la carte de lames. Par interpolation entre les valeurs mesurées, on détermine la dérive, en fonction du temps, de l'épaisseur de référence. Toute dérive des franges de Michelson est prise en compte par le calculateur pour éliminer toute erreur sur la détermination de la frange servant d'origine pour la mesure de pression.

Enfin, nous avons remarqué une différence systématique entre les vitesses de balayage pression dans le Fabry-Perot et dans le Michelson. Des expériences systématiques ont été effectuées; un terme correctif empirique a été prévu pour éliminer cette erreur.

L'ordre de grandeur des erreurs commises, la validité des corrections apportées montrent que l'on peut estimer l'amplitude d'un défaut de planéité avec une précision de $\lambda/1500$. L'expérience confirme parfaitement ce résultat.

L'étude de la carte de lames est faite en mesurant l'épaisseur de l'interféromètre en 81 points, la mesure s'effectue en éclairant une surface d'environ $2mm^2$. A partir de ces mesures ont trace les courbes de niveau. Nous avons essayé de déterminer la validité des courbes de niveau obtenues : les expériences ont montré que sur des cartes de lames de planéité $\lambda/30$, l'erreur commise sur la reproduction des courbes de niveau ne dépassait pas $\lambda/750$. L'importance de cette erreur dépend bien évidemment de la qualité des lames et le cas choisi ici est particulièrement défavorable.

Afin de pouvoir comparer avec précision deux cartes de lames, on modifie par le calcul le plan de référence des cartes de défaut.

En outre, à partir des valeurs enregistrées de la fonction Fabry-Perot, il était possible de déterminer la finesse en chaque point étudié de l'interféromètre et de tracer des cartes de finesse.

Grâce à l'établissement simultané d'une carte de défaut et d'une carte de finesse, il nous est donc maintenant possible d'étudier la qualité et la reproductibilité des revêtements reflecteurs de l'étalon. On dispose ainsi d'une méthode pour mesurer les défauts d'uniformité des couches déposées par évaporation.

En outre, la corrélation entre les inhomogénéités de finesse reflectrice et les défauts de planéité mérite d'être approfondie.

BIBLIOGRAPHIE

[1] R. CHABBAL
"Recherche Des Meilleures Conditions D'Utilisation D'un Spectromètre Photoélectrique Fabry-Perot", J. Rech. Centre National Rech. Sci. Lab. Bellevue, 24, 138 (1953).

[2] S. DAVIS
"Selection of Multilayer Dielectric Coatings for Fabry-Perot Interferometry", Applied Optics 2, 727 (1963).

[3] G. OTTE
"The Use of Teflon Polishers for Precision Optical Flats", J. Sci. Instrum, 2, 622 (1969).

[4] P. GIACOMO
"Les Couches Minces, Comme Eléments d'Optique Moderne", Proceedings of the II Colloquium on Thin Films Ed. E. Hahn, (Budapest : Akademiai Kiado, 1968), pp 225 - 232.

[5] E. PELLETIER
Thèse de 3eme cycle, Paris (1964).

[6] G. KOPPELMANN et K. SCHRECK
"Ein Neues Verfahren Zur Herstellung Von Aufdampfschichten Mit Vorgegebener Dickenverteilung Zur Korrektur Der Unebenheiten Von Fabry-Perot-Interferometer-Spiegelin", Optik, 29, 549 (1969).

[7] G. KOPPELMANN et K. KREBS
"Eine Registriermethode Zur Vermessung des reliefs Höchstebener Oberflächen", Optik, 18, 349 (1961).
"Zur Technologie Des Perot-Fabry Interferometers", Optik, 18,358 (1961).

[8] F. ROESLER et W. TRAUB
"Precision Mapping of Pairs of Uncoated Optical Flats", Applied Optics, 5, 463 (1966).

[9] H.T. DUONG, S. GERSTENKORN et J.M. HELBERT
"Cartes Des Lames d'Un Fabry-Perot", Journal De Physique, 28, C2 - 266 (1967).

[10] G. BENEDETTI-MICHELANGELI
"A New Technique for the Evaluation of the Quality of plane Surfaces", Applied Optics, 7, 712 (1968).

[11] W. PRIMAK
"The Determination of the Absolute Contours of Optical Flats", Applied Optics, 6, 1917 (1967).

[12] R. BUNNAGEL, H.A. OEHRING et K. STEUNER
"Fizeau Interferometer for Measuring the Flatness of Optical Surfaces", Applied Optics, 7, 331 (1968).

[13] I.J. HODGKINSON
"A Method for Mapping and Determining the Surface Defects Function of Pairs of Coated Optical Flats", Applied Optics, 8, 1373 (1969).

[14] Max BORN et Emil WOLF
Principles of Optics, (London : Pergamon Press, 1959), pp. 322 - 332.

[15] F.A. JENKINS et H.E. WHITE
Fundametals of Optics, (Mc Graw-Hill, New York, 1957), 3rd ed., pp. 273 - 274.

[16] Pierre JACQUINOT et Charles DUFOUR
"Conditions Optiques d'Emploi des Cellules Photo-Electriques Dans Les Spectrographes et Les Interféromètres", J. Rech. Centre Nat. Rech. Sci. Lab. Bellevue, 6, 91 (1948).

[17] J. KUHL, A. STEUDEL et H. WALTHER
"A Digital Recording Double Fabry-Perot Spectrometer", Journal De Physique, 28, C2 - 308 (1967).

[18] Pierre GIACOMO
"Methode Directe de Mesure des Caractéristiques d'un Système Interférentiel de Fabry-Perot", Compt. Rend., 235, 1627 (1952).

[19] H.T. DUONG, S. GERSTENKORN et J.M. HELBERT
"Utilisation d'un Interféromètre de Michelson pour l'Etalonnage des Spectres Obtenus A l'Aide du Spectromètre Fabry-Perot Photo-Electrique", Revue de Physique Appliquée, 2, 249 (1967).

[20] Jean-Marie HELBERT
Thèse, Orsay, (1969).

[21] A. SAVITZKI et M.J.E. GOLAY
"Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures", Analytical Chemistry, 36, 1627 (1964).

[22] G. HERNANDEZ
"Analytical Description of a Fabry-Perot Photoelectric Spectrometer", Applied Optics, 5, 1745 (1966).

[23] E.A. BALLIK
"The Response of Scanning Fabry-perot Interferometers to Atomic Transition Profiles", Applied Optics, 5, 170 (1966).